



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사학위논문

물-에너지-식량 넥서스를 위한 시설재배지
물-에너지 관계 분석

Water-Energy Relationship Analysis for
Water-Energy-Food Nexus in Greenhouse

2019년 8월

서울대학교 대학원
생태조경·지역시스템공학부
지역시스템공학전공
김 귀 훈

물-에너지-식량 넥서스를 위한 시설재배지
물-에너지 관계 분석

Water-Energy Relationship Analysis for
Water-Energy-Food Nexus in Greenhouse

지도교수 최 진 용

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함

2019년 7월

서울대학교 대학원

생태조경·지역시스템공학부 지역시스템공학전공

김 귀 훈

김 귀 훈의 공학석사 학위论문을 인준함

2019년 7월

위 원 장

康 文 晁



부위원장

崔 鎭 鎔



위 원

宋 寅 鴻



국 문 초 록

물-에너지-식량 넥서스는 자원 과잉으로 발생하는 많은 문제들의 해결에 도움이 될 것이란 기대를 가지고 등장했다. 물-에너지-식량 넥서스는 2011년 Bonn 회의에서 처음 소개되었고, 물-에너지-식량 넥서스를 제대로 이해하기 위해서는 각 자원간의 관계를 분석하는 것이 매우 중요하다. 본 연구의 목적은 시설재배지에서 물과 에너지의 관계를 분석하는 것이다. 물-에너지 관계를 분석하기 위해 본 연구에서는 기준작물증발산량과 난방 에너지부하를 모의하였고, 이를 위해 난방, 일사, 환기 및 관류열 손실을 입력 변수로 하는 물리 모델을 통해 온실의 실내온도를 모의하였다. 기준작물증발산량과 난방 에너지부하의 산정을 위해서 Hargreaves식과 기간난방부하 산정식을 이용하였다. 실험 대상지는 경기도 용인시에 위치한 4연동 온실이었고, 2011년부터 2012년까지 온실 내부에서 실측된 시간단위 자료를 이용하여 실내온도 모의 모델을 검·보정하였다. 모의 결과는 R^2 , MAE, RMSE를 통해 평가하였고 보정 결과 0.69, 2.77, 3.72 그리고 검정 결과 0.57, 2.67, 3.86로 나타났다. Hargreaves식을 이용한 기준작물증발산량 산정 결과의 검증을 위해 표토 1m 이내에서 측정된 토양수분함수량 자료를 토대로 토양 물수지 분석을 하였다. 2012년 7월 22일부터 10월 28일까지 기간 동안 측정된 자료를 이용하였으며, Hargreaves식을 이용하여 산정하였을 때 총 543mm, 토양물수지 방법으로 계산하였을 때 총 640mm로 계산되었다. 각 모델의 타당성을 검증 한 후, 우리나라의 서로 다른 농업기후지대에 속한

여덟 지역의 기상관측소에서 측정된 기상자료를 적용하였다. 2013년부터 2017년까지 최소 설정온도가 12℃ 일 때 기준작물증발산량과 난방 에너지부하의 평균값은 687mm/year와 2,147GJ/year 로 산정되었다. 최저 설정온도가 18℃인 경우 증발산량과 난방에너지 부하의 평균값은 각각 707mm/year와 5,616GJ/year로 산정되었다. 모의로부터 시설재배지에서 물과 에너지의 관계는 1.0 ~ 2.6GJ/톤으로 산정되었다. 향후 다양한 종류의 온실을 대상으로 세부 모델의 검증이 필요하지만, 본 연구의 결과는 시설재배 단지에서 자원 관계를 평가하기 위해 적용 가능할 것으로 판단된다.

주요어 : 물-에너지 관계 분석, 온도모의 모델, Hargreaves 증발산, 난방에너지 부하

학 번 : 2017-20147

목 차

국 문 초 록	i
목 차	iii
List of Tables	v
List of Figures	vii
제 1 장 서 론	1
1.1 연구배경 및 필요성	1
1.2 연구목적	4
제 2 장 연구사	6
2.1 물-에너지-식량 넥서스	6
2.2 시설재배지 실내 온도모의	10
2.3 기준작물증발산량 산정	11
2.4 기간난방부하 산정	15
제 3 장 재료 및 방법	17
3.1 연구 대상 지역	19
3.1.1 실내온도 모의 및 기준작물증발산량 산정 모델 ...	19

3.1.2 물-에너지-식량 넥서스 분석	21
3.2 물-에너지-식량 넥서스 구성	22
3.3 시설재배지 실내 온도모의	23
3.4 기준작물증발산량 산정 및 적용	26
3.4.1 기준작물증발산량 산정	26
3.4.2 기준작물증발산량 모델의 적용성 평가	28
3.5 난방에너지 부하 산정	29
 제 4 장 결과 및 고찰	 33
4.1 시설재배지 실내온도 모의 검증	33
4.2 기준작물증발산량 산정 검증	38
4.3 지역별 기준작물증발산량 및 기간난방부하 산정	42
4.4 지역별 물-에너지 관계 평가	55
 제 5 장 요약 및 결론	 64
참 고 문 헌	67
Abstract	86

List of Tables

Table 3.1 Compositions of the greenhouse and specifications of AWS in the experimental site	20
Table 3.2 Comparison of parameter specifications between van Henten (1994) and this study	24
Table 3.3 Crop coefficients of greenhouse tomato in Korea ..	29
Table 3.4 Coordinating coefficient depending on the duration of sunshine	30
Table 4.1 Evaluation results of simulated temperature for calibration (2011) and validation (2012)	34
Table 4.2 Weekly cumulated value of irrigation water and ET_c in experimental greenhouse (2012)	41
Table 4.3 Calculated value of Water-energy relationship (GJ/ton) in Chuncheon from 2013 to 2017	56
Table 4.4 Calculated value of Water-energy relationship (GJ/ton) in Suwon from 2013 to 2017	57
Table 4.5 Calculated value of Water-energy relationship (GJ/ton) in Cheongju from 2013 to 2017	58
Table 4.6 Calculated value of Water-energy relationship (GJ/ton) in Daejeon from 2013 to 2017	59
Table 4.7 Calculated value of Water-energy relationship (GJ/ton) in Daegu from 2013 to 2017	60
Table 4.8 Calculated value of Water-energy relationship (GJ/ton) in Jinju from 2013 to 2017	61

Table 4.9 Calculated value of Water-energy relationship (GJ/ton) in Gwangju from 2013 to 2017	62
Table 4.10 Calculated value of Water-energy relationship (GJ/ton) in Jeonju from 2013 to 2017	63

List of Figures

Fig. 1.1 Flow diagram of this study with four steps	4
Fig. 3.1 Flow chart of the study procedures	18
Fig. 3.2 Location of experimental site and weather station (Hong et al., 2013)	19
Fig. 3.3 Location of eight regions selected for comparing water-energy relationships	21
Fig. 3.4 Diagram of the water-energy-food nexus in greenhouse cultivation	22
Fig. 4.1 Scatter plots of the observed and simulated temperature in the experimental greenhouse for calibration (2011)	35
Fig. 4.2 Scatter plots of the observed and simulated temperature in the experimental greenhouse for validation (2012)	36
Fig. 4.3 Observed and simulated temperature in the experimental greenhouse for calibration (2011)	37
Fig. 4.4 Observed and simulated temperature in the experimental greenhouse for validation (2012)	38
Fig. 4.5 Soil moisture content (%) and irrigated water (ton) in the experimental site from 7th July 2012 to 7th November 2012	39
Fig 4.6 Comparison of cumulated ET_c using Hargreaves ET_r and water budget analysis (22nd July 2012 - 28th October 2012) ...	40

Fig. 4.7 Regional estimation of Hargreaves ETr and seasonal heat load	43
Fig. 4.8 Estimation of Hargreaves ETr and seasonal heat load depending on the setting temperature	44
Fig. 4.9 Yearly estimation of Hargreaves ETr and seasonal heat load	45
Fig. 4.10 Estimation of Hargreaves ETr and seasonal heat load in Chuncheon from 2013 to 2017 depending on the minimum temperature setting (12, 14, 16, 18 °C)	47
Fig. 4.11 Estimation of Hargreaves ETr and seasonal heat load in Suwon from 2013 to 2017 depending on the minimum temperature setting (12, 14, 16, 18 °C)	48
Fig. 4.12 Estimation of Hargreaves ETr and seasonal heat load in Cheongju from 2013 to 2017 depending on the minimum temperature setting (12, 14, 16, 18 °C)	49
Fig. 4.13 Estimation of Hargreaves ETr and seasonal heat load in Daejeon from 2013 to 2017 depending on the minimum temperature setting (12, 14, 16, 18°C)	50
Fig. 4.14 Estimation of Hargreaves ETr and seasonal heat load in Daegu from 2013 to 2017 depending on the minimum temperature setting (12, 14, 16, 18 °C)	51
Fig. 4.15 Estimation of Hargreaves ETr and seasonal heat load in Jinju from 2013 to 2017 depending on the minimum temperature setting (12, 14, 16, 18 °C)	52
Fig. 4.16 Estimation of Hargreaves ETr and seasonal heat load in Jeonju from 2013 to 2017 depending on the minimum temperature setting (12, 14, 16, 18 °C)	53

Fig. 4.17 Estimation of Hargreaves ETr and seasonal heat load in Gwangju from 2013 to 2017 depending on the minimum temperature setting (12, 14, 16, 18 °C)	54
Fig 4.18 Water-energy relationship (GJ/ton) in Chuncheon depending on the temperature settings and year	56
Fig 4.19 Water-energy relationship (GJ/ton) in Suwon depending on the temperature settings and year	57
Fig 4.20 Water-energy relationship (GJ/ton) in Cheongju depending on the temperature settings and year	58
Fig 4.21 Water-energy relationship (GJ/ton) in Daejeon depending on the temperature settings and year	59
Fig 4.22 Water-energy relationship (GJ/ton) in Daegu depending on the temperature settings and year	60
Fig 4.23 Water-energy relationship (GJ/ton) in Jinju depending on the temperature settings and year	61
Fig 4.24 Water-energy relationship (GJ/ton) in Gwangju depending on the temperature settings and year	62
Fig 4.25 Water-energy relationship (GJ/ton) in Jeonju depending on the temperature settings and year	63

제 1 장 서 론

1.1 연구배경 및 필요성

세계 인구는 1974년 40억 명을 넘긴 이후 (DESA, 2017), 2019년 기준으로 77억 명을 넘어섰다. 유엔 경제사회국 (DESA)에서 발간한 세계 인구 전망 보고서에 의하면 세계 인구는 지속적으로 증가하여 2100년에는 약 112억 명에 달할 것으로 예측된다. 인구의 증가는 필연적으로 자원 수요의 증가로 이어지는데 지구상에 이용가능한 자원의 총량이 한정적이라는 점에서 여러 가지 문제가 야기 될 수 있다. 또한, 인구의 증가와 더불어 보편적인 생활수준의 향상으로 인류가 필요한 자원은 지속적으로 증가하고 있다. 대표적으로 물, 에너지, 식량은 인간의 생활에 있어서 가장 중요한 자원들이다. 식량과 관련해서는 1인당 1일 칼로리 소비량은 전 세계적으로 1969/1971년 2,370kcal에서 2005/2007년 2,772 kcal로 증가하였고 (FAO, 2012), 에너지 소비량은 1971년 1인당 석유 환산 133.6만 kg에서 2013년 189.4만 kg으로 증가하였다 (World Bank, 2017). 하지만 1인당 자원 소비량의 증가세는 개발도상국의 경제발전 등으로 당분간 지속될 전망이다 (FAO, 2012; UNESCO, 2016; IRENA, 2018). 이 때문에 각 국가들이 지속적인 경제발전을 달성하기 위해서는 자원들을 충분히 확보하는 것은 매우 중요한 문제이다.

한편, 각 자원들은 생산과 소비과정에서 서로 독립적이지 않다는 특성을 가지고 있다. 예를 들어 수력발전에서는 전기를 생산하기 위해 물을 사용하고, 작물로부터 얻어지는 바이오 에탄올의 경우

많은 물과 비료, 농약, 농기계의 연료 등을 소모한다 (Chen et al., 2013). 같은 에너지라도 어떤 과정을 통해 얻어졌느냐에 따라 물, 에너지, 식량 사이의 관계는 달라지는 것이다. 이처럼 각 자원은 상호간에 복잡한 관계를 가지고 있으며, 이에 대한 분석을 통해 동일한 자원의 총량으로 더 많은 인구의 수요를 충족시킬 수 있다. 2011년 Bonn 넥서스 회의에서 처음 소개된 물-에너지-식량 넥서스는 서두의 이러한 필요에 의해 제안되었으며, 많은 연구자들이 관련 연구를 지속적으로 수행 해오고 있다.

우리나라의 경우 에너지를 대부분 수입에 의존하며, 수자원의 경우 강우가 여름철에 집중되어 효율적인 물 사용에 어려움을 겪는다. 이 때문에 우리나라는 과거 1973년과 1978년 2차례에 걸친 석유파동과 최근 2016, 2017년의 극심한 가뭄으로 단순히 에너지와 물의 부족에서 그치지 않고 농업용수, 산업용수, 생활용수 등에 걸쳐 큰 영향을 받았다. 우리나라는 경작 면적이 2017년 기준 약 162만 ha에 불과하고(MAFRA, 2018), 경작 면적 대비 인구가 많아 작은 면적에서 높은 생산성을 필요로 한다. 이로 인해 자원집약적인 농업이 많이 이뤄지고 있으며, 이 중 대표적인 것이 온실에서의 시설재배이다. 시설재배는 외부환경으로부터 내부를 차단하여 습도, 온도, 빛 등의 환경 조건을 작물 생육에 이상적이도록 만들어주기 때문에 에너지와 물이 많이 들어가는 자원 집약적 농업형태이다 (Udink ten Cate, 1983). 우리나라 온실은 터널형 또는 아치형 단동 플라스틱 온실이 대부분을 차지하고 있으므로 냉방을 실시하는 농가는 거의 없고 대부분 고온기에 휴경을 하고 있다 (Nam et al., 2015). 하지만 비교적 추운 겨울을 가진 우리나라 특성상 겨울철에는 많은 에너지가 투입된다(Shin and Nam, 2016). 국내

시설재배 농가 중 겨울철 영농을 하는 축성 토마토 재배의 경우 생산비 중 수도광열비가 차지하는 비율이 농가 총수입의 10%를 넘어갈 만큼 높다 (RDA, 2018). 그리고 이 비용은 작물의 종류 및 내부 설정 온도, 지역 그리고 재배시기에 따라 상이하다. 이에 따라 기후변화 등 외부 조건 변화에 적절하게 대처하고, 농업 생산에 투입되는 자원에 대한 생산성을 평가하기 위해서는 시설재배지에서 지역과 작물의 종류 그리고 시기에 따라 필요한 물과 에너지 부하에 대한 분석이 필요하다.

1.2 연구목적

본 연구에서는 시설재배 온실에서 물-에너지 관계를 분석하기 위해 기준작물증발산량과 난방 에너지를 산정하고자 한다. 이를 위해 시설재배 온실의 제원과 지역별 종관기상관측소 (ASOS, Automated Synoptic Observing System)의 시간별 기상자료를 통해 시설재배 온실의 시간단위 실내온도를 모의한다. 그리고 이를 바탕으로 기준작물증발산량과 난방에너지 부하를 산정하여 물-에너지 관계를 분석하고자 한다. 아래 Fig. 1은 본 연구의 흐름도이며, 4가지 단계로 구분하여 나타내었다. 첫 번째 단계에서는 대상 시설재배 온실의 시간단위 실내온도를 모의하는 것이며, 두 번째 단계에서는 모의한 시간단위 실내 온도를 바탕으로 Hargreaves식을 이용하여 기준작물증발산량을 산정하는 것이다. 이후 세 번째 단계에서는 기간난방부하를 산정하여 대상 시설재배 온실에서의 난방 에너지를 계산하는 것이며, 네 번째 단계에서는 시간단위 실내 온도, 지역, 연도 등 다양한 조건에서 1 ~ 3 단계를 모의하고, 이로부터 얻은 기준작물증발산량과 난방 에너지를 이용하여 자원 간의 관계에 대해 분석한다.

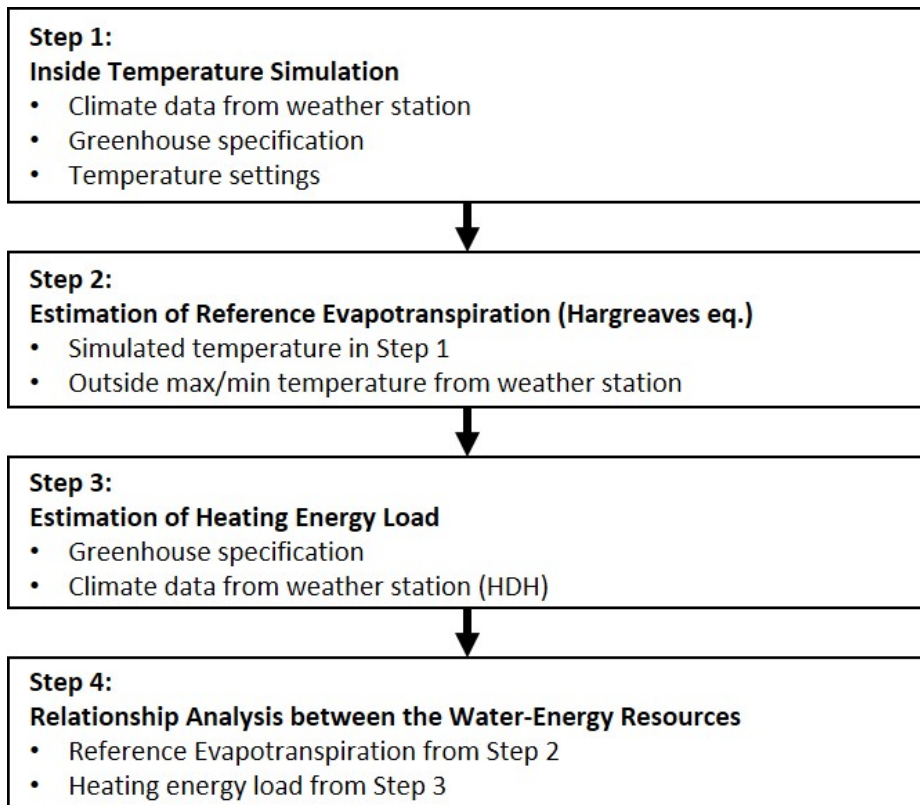


Fig. 1.1 Flow diagram of this study with four steps

제 2 장 연구사

2.1 물-에너지-식량 넥서스

넥서스는 문헌에 따라 다양하게 정의되어 사용되고 있으며, 사전적인 넥서스의 뜻은 연결, 연계, 그룹 및 연속의 관계라는 의미를 가지고 있다. 또한 넥서스라는 용어는 관련성이 있는 각 분야의 통합적 의미로 사용되거나, 문제해결의 접근법으로 사용된다. 기존 연구에서는 물-에너지, 물-에너지-식량, 기후-분쟁, 물-에너지-기후-토지 등과 같이 관련 있는 요소들을 묶어 구성 요소들 간의 연계성을 설명하고, 격리된 해결방안을 넘어선 통합적인 접근의 필요성을 강조하였다 (김동현 등, 2015).

물, 에너지, 식량을 포함하는 넥서스에 대한 연구는 구성하는 요소의 종류에 따라 물-에너지 넥서스, 식량-에너지 넥서스, 물-에너지-식량 넥서스 등으로 구분할 수 있다 (Mohtar and Daher, 2012). 식량-에너지 넥서스의 경우 바이오 연료 생산과 이에 따른 영향을 평가하는 연구가 대표적이다 (Fingerman et al., 2011; Gheewala et al., 2011). 물-에너지 넥서스에 대한 연구는 물을 위해 에너지를 사용하는 경우와 에너지를 위해 물을 사용하는 경우로 나뉘볼 수 있다. 농업과 관련해서는 관개용수의 위치에너지를 변화시키기 위해 사용되는 에너지를 분석하며 (Siddiqi and Anadon, 2011), 도시에서는 물 공급을 위해 사용된 에너지를 분석한 연구가 있다 (Vilanova and Balestieri, 2015; Valek et al., 2016). 에너지를 위해 물을 사용하는 경우는 수력발전에서 소모된 물과 발전량 간의 관계를 분석하는 연구가 주로 이뤄졌다 (Pittock et al., 2016; Shang

et al., 2018). 물-에너지-식량 넥서스에서는 작물의 소비수량과 연관된 가상수를 적용하여 연계 분석한 연구가 있었으며 (White et al., 2018; Salmoral and Yan, 2018), 작물 소비수량을 산정하여 작물 생산량을 가상수로 분석한 연구도 있어 적용성이 비교적 넓은 편에 속한다 (Talozi et al., 2015).

물-에너지-식량 넥서스는 각 자원의 상충관계 (trade-off)와 상승관계 (synergy)를 분석하여 자원을 보다 효율적으로 이용하기 위해 등장한 개념이다 (Choi, 2017). 2011년 세계경제포럼 (World Economic Forum)에서 제시되었으며, 2015년 SDGs (Sustainable Development Goals)가 제안된 이후 이를 달성하고자 하는 노력으로 자원 간 관계를 분석하는 연구가 활발히 이뤄져 오고 있다. 물-에너지-식량 넥서스는 모델링, 통계모형 등을 기반으로 한 정량적 연구가 주를 이루며 (김동현 등, 2015), FAO, EU와 같은 국제기구와 Texas A&M, SEI (Stockholm Environment Institute)과 같은 대학과 연구기관에서도 연구가 진행되고 있다.

FAO(2013)는 물-에너지-식량 넥서스에 대한 분석을 위해 Multi-Scale Integrated Assessment of Society and Ecosystem Metabolism(MuSIASEM)을 제시하였는데, MuSIASEM은 분석 대상 지역 내에서 자원 이용 상황을 산업 연관표나 사회 계정 행렬 등을 바탕으로 분석한다. FAO(2014)는 Nexus Assessment 1.0 넥서스를 바탕으로 한 정책 의사결정 과정과 지수를 바탕으로 한 양적 평가 방법을 제시하였는데, 물-에너지-식량-노동-자본 관련 상황을 관련 지표들을 바탕으로 나타내고 지표의 변화를 통해 정책 변화의 영향을 계측한다 (성재훈 등, 2018).

SIM4NEXUS는 EU에서 진행중인 연구로,

물-에너지-식량-토지-기후 넥서스를 바탕으로 하고 있으며, 7가지 주제별 모형(thematic model)들을 바탕으로 외부환경 혹은 정책 변화의 영향을 평가한다. 7가지 모형에는 시나리오 기반의 IMAGE 모형, 경제학적 모형인 E3ME, MAGNET, 농업에 특화된 경제학적 모형인 CAPRI, 에너지 수급모형인 OSeMOSYS, 수문학 모형인 SWIM, 토지이용 모형인 MAgPIE-LPJmL이 포함된다. 또한 SIM4NEXUS는 기능성 게임 (Serious game)을 적용해 분석결과를 점수화하여 이를 바탕으로 한 컨설팅도 제공한다 (성재훈 등, 2018).

CLEW(Climatic, Land-use, Energy and Water) 모형은 에너지 밸런스와 식량 생산을 위한 에너지량, 수자원 밸런스와 식량 생산을 위한 관개량, 에너지 생산을 위한 수자원량 등을 결과로 도출하며, 식량 부문에 있어서 비료사용량이나 농기계 사용량 등을 고려할 수 있는 특징이 있다 (Lee et al., 2018).

WEF Nexus Tool 2.0은 미국 텍사스 A&M 대학에서 개발된 모형으로, 기존 모형의 한계를 극복하기 위해서 개발된 플랫폼형 모형이다. 의사결정을 돕기 위한 시나리오 기반의 분석이 가능하나, 분석과정에서 자원간의 흐름을 단일화 하여 분석하고 있으며, 최대 임계치 및 상호 피드백 작용에 대한 고려는 부족한 것으로 알려져 있다 (Lee et al., 2018).

위의 기존 연구들은 구축된 통계자료를 통해 도출된 자원 간 관계식과 사용자가 입력한 시나리오를 바탕으로 지속가능성을 평가하였다. 그러나 이러한 접근 방법은 구축된 통계자료의 지역적 범위를 벗어날 경우 적용이 불가능한 경우가 있고, 사용자가 입력하는 시나리오에 국한된 구조로 인해 기후변화와 같은 외부 조건을 유연하게 모의하지 못한다는 단점이 있다. 시뮬레이션

기반의 물-에너지-식량 넥서스 분석을 위해서는 통계자료만을
이용한 방법이 아닌 온실 내부에서 각 자원의 상충 및 상승 관계를
모의하는 것이 필요하다.

2.2 시설재배지 실내온도 모의

시설재배지에서 물-에너지 사용과 관련이 있는 기준작물증발산량과 난방에너지 부하를 산정하기 위해서는 온실 내부에서 측정된 온도 자료가 중요한 요소인데 (Fernandez, 2010; Nam and Shin, 2015), 지역 단위의 모든 시설재배지에서 내부 온도를 측정하는 것은 현실적으로 매우 어려운 일이다. 이 때문에 실측할 수 있는 자료를 바탕으로 온실 내부의 온도를 모의하는 것이 필요하다. 온실 내부 온도모의에 관한 연구는 국내에서 Hong et al. (2015)이 시설 외부의 기상 변화에 따라 데이터 기반의 블랙박스 모델을 이용하여 시설 내 기온의 변화를 예측하였다. 또한, Ha et al. (2015)은 김제시에 위치한 유리온실에서 BES (Building Simulation Model)을 적용하여 실내온도를 모의하였고, 가장 좋은 시나리오의 경우 평균 1.1℃, 최대 3.3℃ 차이를 보였다. 이승노 등 (2016)과 이승노 (2017)는 BES 모델에 작물과 토양에서의 에너지 교환을 고려하여 온실 내부온도를 모의하였고, 기존 연구보다 더 높은 정확도를 보였다. BES 모델을 이용한 온실 실내온도 모의 연구들은 비교적 높은 정확도를 보였으나, 정확도에 비해 모델을 설계하기 위해 들어가는 소요가 크다는 단점이 있어 지역 단위의 모의를 위해서는 보다 간단한 방법을 필요로 한다.

한편, 국외에서는 생물 환경조절에 대한 정성적 분석을 위해 실내 온도를 모의하고자 하는 연구가 있었다 (Udink ten Cate et al. 1978). 이후 Bot (1983)과 Udink ten Cate (1983)에 의해 실내 온도 모의에 대한 모의 식들이 제시되었으며, 이후 난방, 태양복사, 관류열 손실, 틈새 및 인위적 환기를 변수로 삼는 물리 모델을

이용하여 단위시간동안 내부온도를 모의하였다 (van Henten, 1994; van Henten et al., 2009). 이후 van Beveren et al. (2015)은 온실 환경과 경제성을 최적화하기 위해 이 식을 이용하여 투입 에너지와 작물 생육 정도 등 각 변인들에 범위를 설정하여 온실 내부온도를 모의하였다. Chen et al. (2018)은 물리 모델에 PSO (Particle Swarm Optimization)을 적용하여 온실 내부 온도 및 환경조절 조건들을 30초 단위로 모의하였다.

2.3 기준작물증발산량 산정

기준작물증발산량을 산정하는 방법은 실측에 의한 직접법과 추정공식을 이용한 간접법이 있다. 직접법에는 생체가 너무 큰 작물에는 적당하지 않은 칭량법, 물수지법, 포장수분추적법, Chamber 법, Lysimeter 법 등이 있다. 이들 방법은 증발산량을 측정하는 데 많은 노동과 시간이 소요되는 단점이 있지만, 작물의 실제 증발산량을 비교적 간단하게 측정할 수 있으며, 추정공식에 의한 추정값과 비교할 수 있는 척도로써 이용할 수 있다 (박기중 외, 1999; 유승환, 2006).

간접법은 크게 태양 복사, 대기 복사, 기온, 습도 및 풍속 등의 미기상학적 인자를 이용하여 이론적으로 증발산량을 산정하는 미기상학적 방법 (Micrometeorological method)와 이러한 기상인자를 이용하여 경험식을 개발하여 증발산량을 추정하는 경험적 방법 (Empirical method)로 분류된다 (박기중 외, 1999; 유승환, 2006).

미기상학적 방법은 물질 이동에 기초하는 Profile 법, 지표면에서

에너지의 유입과 출입에 의존하는 Energy balance-Brown ratio 법, 그리고 이들의 조합으로 이루어진 Combination 법, 공기에 의해 순간적으로 상향하는 수분의 양을 측정장치를 통하여 구하는 Eddy correlation 법으로 세분할 수 있다. 또한 경험적 방법은 에너지 수지에 기초를 두는 Radiation equation을 수정한 Humidity 법, 그리고 Pan이나 Evaporimeter 법으로 세분할 수 있다 (박기중 외, 1999; 유승환, 2006).

Jensen 등은 증발산량이 최고인 달의 일 평균 상대습도를 기준으로 60% 미만인 지역은 건조지역으로, 60% 이상인 지역은 습윤 지역으로 구분하여 건조지역 5개 지역, 습윤 지역 6개 지역 등 전체 11개 지역을 대상으로 월 평균 증발산량을 Lysimeter에 의한 실측치와 19개의 추정공식들의 결과치를 비교하였다. 공식 추정값과 Lysimeter 관측값의 가중 평균치를 비교한 결과, 건조지역에서는 Penman-Monteith, Kimberly-Penman (1982), FAO-24 Radiation, Penman VPD #3 (1963), FAO PPP-17 Penman의 순으로 잘 일치하는 것으로 나타났으며, 습윤 지역에서는 Penman-Monteith, Turc, Penman (1963), FAO PPP-17 Penman, Priestley-Taylor의 순으로 나타났다. 또한 모든 지역에서 월별 잠재증발산량 추정공식들을 비교하였을 때에는 Penman-Monteith, Kimberly-Penman (1982), FAO PPP-17 Penman, Penman (1963), Penman VPD #3 (1963)의 순으로 실측치와 잘 일치하는 것으로 나타났다 (Jensen 등, 1990; 유승환, 2006).

국내에서는 김전주 등 (2003)에 의해 노지 밭에서 재배된 고추, 콩, 배추를 대상으로 Blaney-Criddle 법, Penman 법, Penman-Monteith 법을 적용하여 작물 증발산량을 산정하고

적용성을 평가하였다. 산정 결과 Penman-Monteith 법, Penman 법, Blaney-Criddle 법 순으로 실측치와의 오차가 적은 것으로 나타났다.

Zhang and Lemeur (1992)는 시설재배지에서의 작물증발산량을 모의하기 위해 Penman-Monteith식을 이용하였다. Fernandez (2010)는 지중해 연안의 온실에서 다년생의 잔디를 대상으로 FAO 56 Penman-Monteith 식, FAO 24 Penman 식, FAO 24 일사량법, FAO 증발계법, Hargreaves 식을 통해 작물증발산량을 모의하였고, Penman-Monteith식과 Hargreaves식 두 가지 방법이 R^2 0.97의 결과를 보였다. 또한 Moazed et al. (2014)는 이란의 온실에서 잔디를 대상으로 기준작물증발산량을 산정하였으며 Penman-Monteith식을 이용하였을 때 R^2 0.95로 가장 높은 정확도를 보였다.

하지만 Penman-Monteith식은 모의를 위해 필요한 입력 자료가 비교적 많아 입력에 필요한 자료가 없을 경우 적용하기 힘들다는 단점이 있다. 이에 반해 Hargreaves식은 일별 최대·최소 온도자료만을 이용하여 일별 잠재증발산량을 모의할 수 있어 적용성이 높은 방법이다. Hargreaves식은 1968년 제안된 Christiansen식에서 발전되었다. Christiansen식은 지표면에서의 일사량과 온도, 상대습도, 풍속에 대한 계수를 이용하여 잠재증발산량을 추정하며, 이로부터 Hargreaves (1975)에 의해 일별 평균기온과 지표면에서의 일사량을 통해 잠재증발산량을 모의하는 Hargreaves식이 소개되었다. 이후 Hargreaves (1981)과 Hargreaves and Samani (1982)에 의해 외기복사와 일별 최대기온과 최저기온의 차이, 그리고 지역별 태양복사의 도달

계수를 통해 일사량을 모의하는 방법이 제안되었으며, Hargreaves et al. (1985)는 이를 1975년 Hargreaves식에 적용하여 일별 평균기온과 최대·최저기온의 차이만으로 잠재증발산량을 산정할 수 있는 Hargreaves식을 고안하였다 (Hargreaves et al., 2003).

2.4 기간난방부하 산정

기간난방부하를 산정하는 방법은 난방적산온도를 이용하는 방법과 동적시뮬레이션을 이용하는 방법이 있다. 난방적산온도에는 매시간의 온도차를 적산한 난방 degree-hour와 매일의 온도차를 적산한 난방 degree-day가 있으며, 동적시뮬레이션을 이용하는 방법으로는 대표적으로 TRNSYS 프로그램을 이용한 예측이 있다. 하지만 동적시뮬레이션을 이용하는 방법은 온실의 특성을 명확히 반영하기에는 어려움이 있으며, 난방 degree-day 방법의 경우 간편하지만 설정온도가 낮을 경우 오차가 크게 발생하는 단점이 있다 (Nam et al., 2014; Nam and Shin, 2015).

여러 가지 난방 degree-hour 산정 식 중 Nam et al. (2014)는 수정 Mihara 식으로 구한 것이 표준기상데이터로 구한 것과 잘 일치하였음을 제시하였다. 일본에서는 초기에 난방 부하 감소분을 고려하여 최대난방부하 계산시 사용되는 열관류율의 75 %를 적용한 평균난방부하계수를 사용하였다 (Mihara et al., 1980). 하지만 주야간 구분 없이 획일적으로 난방부하계수를 적용하는 것은 오차를 발생시키며, 이에 따라 일본에서는 주야간 구분하여 야간 난방부하는 난방 degree-hour로 관류열 부하를 구하고 지중전열부하의 경험치를 고려하며, 주간 난방부하는 야간 난방부하에 대한 경험적 비율을 적용하고 있다 (JGHA, 2007).

국내에서는 미국과 일본의 방식을 참고하여 온실의 기간난방부하를 산정하고자 하는 노력이 있었다. Kim et al. (1992)은 표준기온곡선식으로 난방디그리아워를 구하였고, Nam (2006)은 지중가온이 난방부하에서 차지하는 비율을 분석하였으며,

농촌진흥청에서는 농업시설의 에너지이용 현황을 진단하고 농업시설의 효율적 에너지이용을 위해 에너지 진단·컨설팅 시스템을 개발 하였다 (농촌진흥청, 2012). 이후 Nam and Shin (2015)은 미국농공학회 (Lindleyand Whitaker, 1996)의 난방 degree-day와 연간 일조시간에 따른 조정계수를 이용하는 방법으로 플라스틱 온실에서 기간난방부하를 산정하는 방법을 개발하였고 (Nam et al., 2015; NAAS, 2015), 국립농업과학원 (National Academy of Agricultural Sciences)에서는 이를 바탕으로 2015년 온실환경설계기준을 만들어 현재 국내 온실에서 난방부하 산정에 이용되고 있다.

제 3 장 재 료 및 방 법

본 연구에서는 물리 모델을 이용하여 시설재배 온실의 내부 온도를 모의하고, 이 값을 바탕으로 기준작물증발산량과 난방에너지 부하를 산정하여 서로 간의 관계를 분석한다. 물리 모델은 난방, 일사량, 환기량, 관류열 손실량으로 온실 실내온도를 모의하며, 기준작물증발산량은 온실 내부에서 작물 필요수량을 산정하기 위한 기준값을 의미한다. 난방에너지 부하는 온실의 종류, 기상 조건, 실내 설정온도 등에 따라 다양하게 나타난다.

본 연구에서는 온도모델 모의를 위해 입력자료로 가장 가까운 수원 기상관측소에서 측정된 1시간 단위 기상자료를 적용하고, 검증을 위해 사용된 자료는 4연동 플라스틱 온실에서 1시간 단위로 측정된 1시간 단위 실내온도이다. 작물 증발산량 검증을 위해 실험 온실에서 실측된 토양수분함수율 자료를 사용하며, 토양수분함수율 자료는 지표로부터 10, 30, 60, 90cm 깊이에서 측정되었다.

모형의 적용 결과는 온도모의 모델은 시간단위 실측 온도값을 대상으로 그래프 개형, 산포도, MAE, RMSE, R^2 를 이용하여 평가하며, 기준작물증발산량은 토양수분함수율 실측값을 바탕으로 토양 물수지 분석을 통해 계산한 그래프 개형으로 평가한다. Fig. 3.1은 본 연구의 흐름도를 나타낸 것이다.

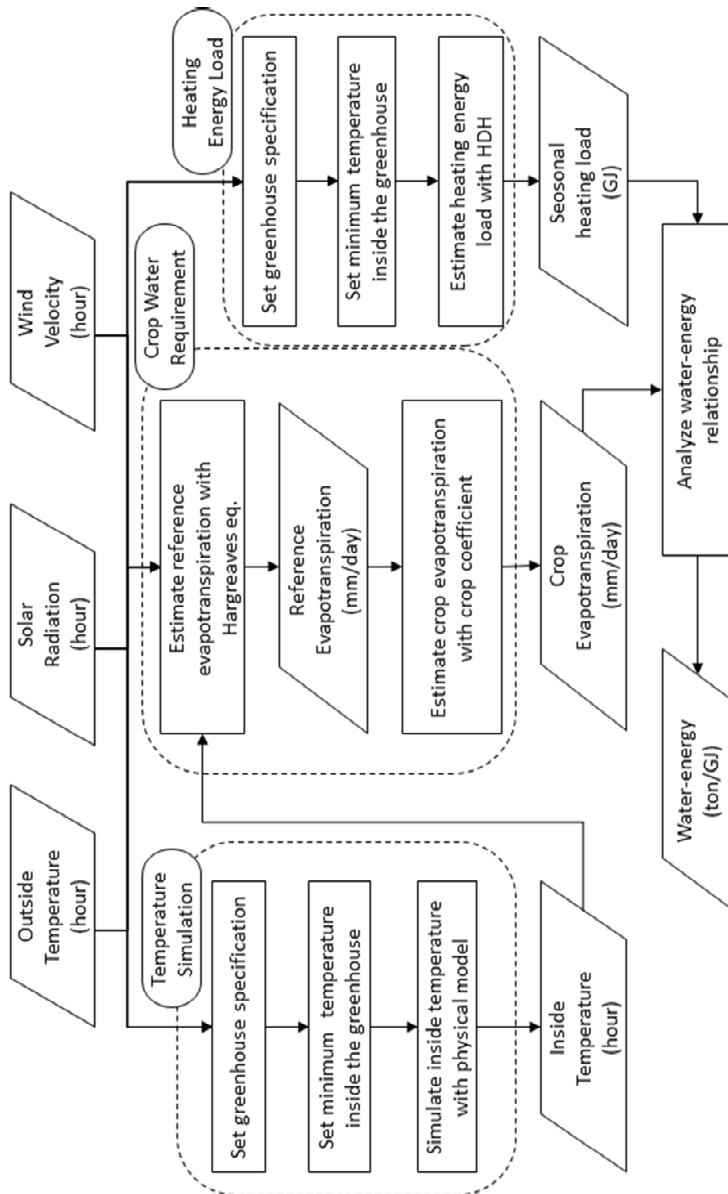


Fig. 3.1 Flow chart of the study procedures

3.1 연구 대상 지역

3.1.1 실내온도 모의 및 기준작물증발산량 산정 모델

본 연구에서는 경기도 용인시 처인구 남사면 진목리 (E 37° 06' 04", N 127° 08' 08")에 위치한 이동저수지 주변 시설재배지를 연구 대상 지역으로 선정하였고 그 위치는 Fig. 3.2와 같다. 또한 온실 내부온도를 모의함에 있어 필요한 기상자료는 수원 종관기상관측소 (ASOS, Automated Synoptic Observing System) (E 37° 16' 20", N 126° 59' 07")의 시간별 자료를 이용하였다. 실험 온실과 기상관측소는 직선거리로 약 23.1km 떨어져 있다.



Fig. 3.2 Location of experimental site and weather station (Hong et al., 2013)

실험 온실은 1-2W형 4연동에 염화비닐 필름으로 이중 피복되었고, 온실의 가로 길이와 세로 길이는 각각 100 m 와 30 m 이다. 동고와 측고는 1-2W형 온실의 표준인 4.7 m와 2.8 m로 계산하였다. 온실 내부에 설치된 AWS (Automated Weather System)은 Watchdog사의 제품을 사용하였고 성능은 아래 Table 3과 같으며, 온도의 측정 오차는 $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ 이다.

Table 3.1 Compositions of the greenhouse and specifications of AWS in the experimental site

Greenhouse			AWS	
Type	Cover	Size	Specification	Accuracy
1-2W (four-span arch-typed)	Double cover with Vinyl chloride	100m × 30m	-40°C ~ 125°C	$\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ at -40°C~90°C

연구대상지역의 시설재배지는 기존의 논을 전환하여 이용하고 있었으며, 0~60cm까지의 상부 토층은 인위토양으로 사양토 (sandy loam)로 구성되어있고, 60cm 이하 토층은 양토 (loam), 사양토 및 미사질 식양토 (sandy clay loam)로 구성되어 있다 (홍은미, 2013).

3.1.2 물-에너지-식량 넥서스 분석

본 연구에서는 시설재배 온실에서 모의한 실내온도 값을 이용하여 물-에너지 자원 투입 관계를 분석하고자 한다. 이때 3.1.1의 연구대상지 시설온실을 이용하여 보정한 실내온도 모의식의 계수와, 동일한 온실 제원 값을 사용하여 우리나라에서 서로 다른 농업기후 지대에 속한 여덟 지역에 적용하였다 (Kim et al., 2016).

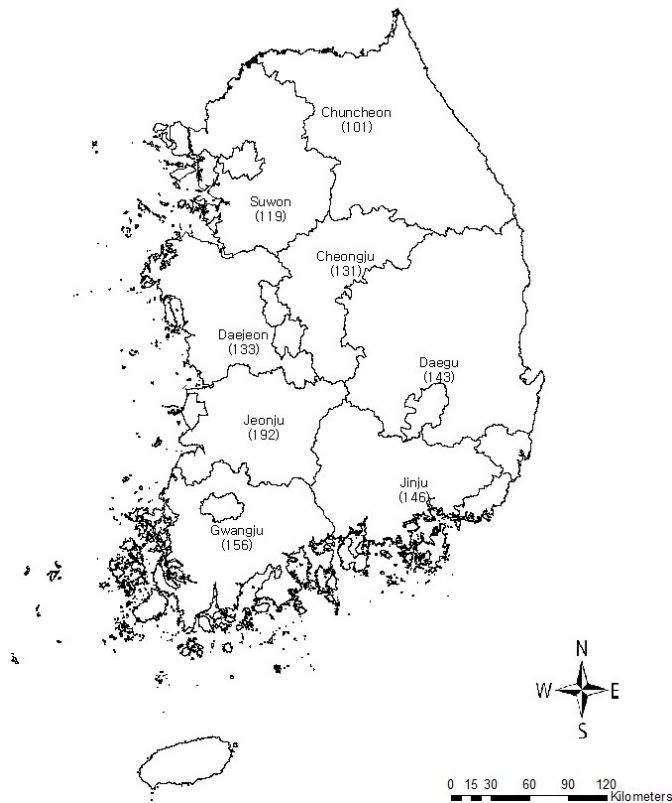


Fig. 3.3 Location of eight regions selected for comparing water-energy relationships

3.2 물-에너지-식량 넥서스 구성

아래 Fig. 3.3은 본 연구에서 분석하고자 하는 물-에너지-식량 넥서스의 모식도이다. 수원 기상대에서 얻은 시간단위 온도, 일사량, 풍속 자료와 온실 제원, 실내 설정온도를 이용하여 온실 내부 온도를 모의한다. 이후 모의된 실내온도의 일 평균값과 일별 최대·최소 실외온도를 바탕으로 기준작물증발산량을 산정한 후, 작물계수를 곱해 작물필요수량을 산정하여 시간단위 실내온도와 설정온도의 차이로부터 시설 내의 난방 에너지 부하를 산정한다. 이어서 산정된 값을 시설재배지에서의 물과 에너지 필요량으로 하여 이들의 관계에 대해 분석한다.

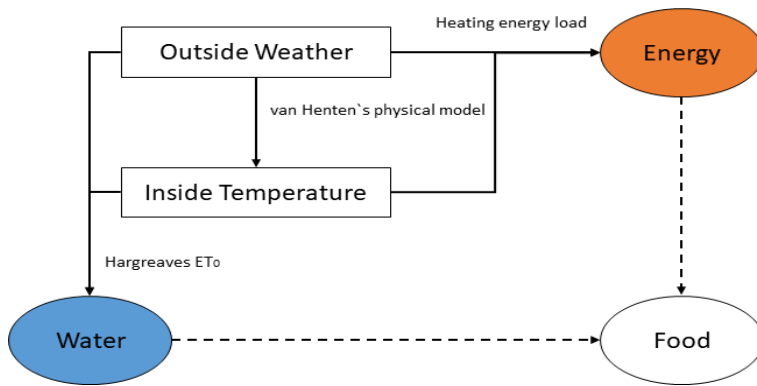


Fig. 3.4 Diagram of the water-energy-food nexus in greenhouse cultivation

3.3 시설재배지 실내 온도모의

실제 온실 내 열역학은 에너지 전달과 물질균형의 조합으로 계속해서 변화 한다 (Chen, 2018). 하지만 본 연구에서는 향후 시설재배지역의 자원투입량을 광역단위로 산정하고자하기 때문에 온실 내 열분포의 편차로 인한 오차가 상대적으로 작을 것으로 예상되며, 이에 따라 시설 내부의 공기는 모두 균질하며 같은 온도를 가지고 있다고 가정한 van Henten (1994)의 식을 사용하였다. 아래 식 (3.1)은 실내 온도모의 모델의 계산식으로 내부의 변인과 외부 기상 그리고 실내 고정된 조건들로 구성되어 단위시간으로 차분하여 수치해석으로 실내온도의 변화를 구한다.

$$\frac{dT_{in}(t)}{dt} = \frac{1}{C_g} [u_q(t) + C_{rad}S_r(t) - \{T_{in}(t) - T_{out}(t)\} \{c_{cap}u_v + c_{ai}\}] \quad (3.1)$$

$T_{in}(t)$ 는 실내온도, $T_{out}(t)$ 는 실외온도를 나타내며, C_g 는 내부 공기의 단위 면적당 비열로 van Henten (1994)에 의해 제시된 실험값이다. u_q (W/m^2)는 시설 내 난방기에 의한 난방, C_{rad} 는 태양복사에 의한 열 부하계수, S_r (W/m^2)은 온실 외부의 태양복사, C_{cap} 는 시설 내부 공기의 부피 단위 비열, u_v 는 환기율, C_{ai} (W/m^2K)는 시설의 평균 관류열 손실이고, 값은 아래 Table 3.2와 같다.

Table 3.2 Comparison of parameter specifications between van Henten (1994) and this study

Parameter		C_g	C_{rad}	C_{cap}	C_{ai}	S_r	u_v	$T(t)$	u_q
Unit		J/m^2 K	–	J/m^3 K	W/ m^2K	W/m^2	m/s	$^{\circ}C$	W/m^2
Value	van Henten (1994)	30,000	0.2	1,290	6.1	input			
	this study	30,000	0.2 ~ 0.3	1,290	3.1	input			

van Henten (1994)과 Chen et al. (2018)에서는 관류열 손실 C_{ai} 값으로 $6.1W/m^2K$ 를 적용하였는데, 본 연구는 NAAS (2015)의 온실환경설계기준을 참고하여 실험 대상온실에 해당하는 $3.1W/m^2K$ 를 적용하였다. u_q 는 최대난방부하 값을 계산하여 실험 대상온실의 경우 $150W/m^2$ 으로 설정하였다. S_r 은 수원 기상관측소에서 측정된 시간별 일사량 값을 적용하였다. u_v 는 기상관측소의 풍속자료에 $3.75 \times 10^{-4} \sim 7.5 \times 10^{-4}$ 의 값을 곱하여 적용하였다. van Henten (1994)와 Chen et al. (2018)은 C_{rad} 를 0.20으로 모의하였으나, 본 연구에서는 겨울철에 일별 최대 기온이 $0^{\circ}C$ 아래로 내려가는 경우 C_{rad} 값을 0.30으로 조정하여 모의하였다. van Henten (1994)이 모델의 보정을 위해 사용한 네덜란드 외부 기온이 한국의 겨울철에 비해 높아 겨울철 한국의 온실에서는 일사량의 영향이 과소하게 반영되는 경향이 있었기 때문이다. van Henten (1994)의 식은 아래 식 (3.2)과 같이 풀이되며 $t=0$ 일 때의

초기값으로는 최저설정온도를 적용하였다.

$$T_{in}(t + \Delta t) = T_{in}(t) + \frac{120}{30,000} [u_q(t) + 0.2S_r(t) - \{T_{in}(t) - T_{out}(t)\} \{1,290u_v(t) + 3.0\}] \quad (3.2)$$

여기서 t 는 시간, $T_{in}(t)$ 은 t 시간의 실내온도, Δt 는 단위 시간으로
본 연구에서는 성능이 가장 좋은 120초를 단위시간으로 설정하였다.

3.4 기준작물증발산량 산정 및 적용

3.4.1 기준작물증발산량 산정

기준작물증발산량을 산정하는 공식은 FAO에 의해 Blaney-Criddle식, FAO 56 Penman-Monteith식, FAO 24 Penman식, FAO 24 일사량법, FAO 증발계법, Hargreaves 등이 제안된다 (Allen et al., 1998). 본 연구에서는 노지재배가 아닌 시설재배지 내의 기준작물증발산량을 산정하며, 연구의 목적상 입력 자료로 온도자료만을 이용하여 모의할 수 있는 Hargreaves식을 이용하였다. Hargreaves식은 Christiansen식에서 발전되었으며 (Hargreaves et al., 2003), 아래 식 (3.2)는 1968년 제안된 Christiansen 식이다.

$$ET_0 = 0.385R_s \times CT \times CH \times CW \quad (3.3)$$

ET_0 는 기준작물증발산량 (mm/day), R_s 는 지표면에서의 일사량 (MJ/day/m²), CT, CH, CW는 각각 온도, 상대습도, 풍속에 대한 계수이다. 이후 Hargreaves (1975)에 의해 Hargreaves식이 소개되었으며, 섭씨 단위로 표현된 식은 아래 식 (3.3)과 같다.

$$ET_0 = 0.0135 R_s (TC + 17.8) \quad (3.4)$$

TC는 일별 평균기온을 의미하며, Hargreaves (1981)과 Hargreaves

and Samani (1982)에 의해 일사량을 모의하는 아래 식 (3.4)가 소개되었다.

$$R_s = K_{RS} \times R_a \times TR^{0.50} \quad (3.5)$$

TR (°C)은 일별 최대기온과 최저기온의 차이를 의미하고, R_a (MJ/day/m²)는 구름의 영향을 받지 않은 대기권 밖의 외기복사를 의미하며, K_{RS} 는 R_a 와 R_s 의 비율을 경험적으로 구한 값이다. 식 (3.3)과 식 (3.4)로부터 Hargreaves et al. (1985)는 Hargreaves식을 제안하였으며, 아래 식 (3.5)는 본 연구에서 기준작물증발산량 산정을 위해 사용된 Hargreaves 식이다.

$$ET_0 = \alpha R_a \tau (TC + 17.8^\circ\text{C}) TR^{0.50} \quad (3.6)$$

여기서 ET_0 는 기준작물증발산량 (mm/day), $\alpha = 0.0023$ (mm/day·MJ·°C^{1.5}) R_a 는 일별 일사량의 합 (MJ), τ 는 온실의 일사 투과율, TC는 온실 내부의 일평균 기온 (°C), TR은 온실 외부에서 측정된 일별 최고기온과 최저기온의 차이 (°C) (Hargreaves et al., 2003; Fernandez et al. 2010). 본 연구에서 R_a 는 수원 기상관측소의 위도를 기준으로 계산하였고, τ 는 실험 대상 온실에서 측정된 일사량의 평균 투과율 46%를 (Hong et al., 2013), TC은 실내온도 모의 모델을 통해 모의된 값을 적용하였고, TR은 수원 기상관측소에서 측정된 일별 최고기온과 최저기온을

이용하였다.

3.4.2 기준작물증발산량 모델의 적용성 평가

본 연구에서는 모의한 기준작물증발산량 모델의 적용성을 평가하기 위해 토양 물수지 분석을 하였다. 물수지 분석을 하기 위해 적용한 식은 아래 식 (3.6)과 같다.

$$ET_c = -\Delta\theta + R + I - D \quad (3.7)$$

ET_c (mm/day)는 일별 작물증발산량, $\Delta\theta$ 는 토층에서의 일별 토양수분보유량 변화, R 은 강우량, I 는 관개량, D 는 배수량이다. 강우는 0이 되며, 시설재배지에서 물수지식을 이용하여 잠재증발산량을 추정한 정강호 등 (2005)의 연구를 참고하여 배수량은 0으로, 토양수분보유량은 1m까지의 토양수분의 총량으로 가정하였다.

토양수분보유량의 변화를 계산하기 위하여 FDR (Frequency Domain Reflectometry)을 이용하여 모니터링 한 토양수분함수량 자료를 이용하였다. 토양수분함수량 자료는 10, 30, 60, 90cm 토층에서 15분 간격으로 측정이 되었으며, 각각은 0-20cm, 20-40cm, 40-70cm, 70-100cm 토층에서의 토양수분으로 가정하였다. 시설재배지에서의 관개량, 관개 횟수 및 시간을 파악하기 위하여 시설재배지 내에 유량계를 통해 관개량을 측정하였다.

또한, Hargreaves식을 이용하여 구한 기준작물증발산량에 해당기간 재배된 토마토의 작물계수를 적용하여 토양 물수지를 분석하였으며,

Table 3.3은 정강호 등 (2005)이 제안한 국내 시설재배지에서 재배된 토마토의 생육시기별 작물계수이다.

Table 3.3 Crop coefficients of greenhouse tomato in Korea

Crop		Planting date	G1	G2	G3	G4
Tomato	Day after planting	6 th June	~10	~40	~80	after 80
	Crop coefficient	-	0.62	1.06	1.27	1.25

3.5 난방에너지 부하 산정

NAAS (2015)의 온실 환경설계기준과 Nam et al. (2015)에 의하면 온실의 기간난방부하는 난방디그리아워 (HDH, Heating Degree-Hour)와 평균난방부하계수를 이용하여 아래 식 (3.7)로 구한다.

$$Q_H = k_c \bar{U} A_c (HDH) \quad (3.8)$$

Q_H 는 기간난방부하(J), \bar{U} 는 평균난방부하계수 ($W/m^2\text{ }^\circ\text{C}$), A_c 는 온실의 피복면적(m^2), HDH는 난방디그리아워 ($^\circ\text{C} \cdot h$), k_c 는 일조시간에 따른 조정계수이다. 평균난방부하계수는 아래 식 (3.8)로 구하며, 최대난방부하 (H_T)는 식 (3.10)과 같다. 이때, T_{in} 에는 실내온도 모의 값을 적용하였다.

$$\bar{U} = \frac{H_T}{A_c(T_{in} - T_{out})} \quad (3.9)$$

HDH는 설정온도와 외기온의 차이를 적산한 것으로 주간에 외기온이 설정온도보다 낮으면 플러스가 되지만 일사량 때문에 난방이 필요 없는 경우가 있다. 따라서 기간난방부하의 계산에서 일조시간에 따른 조정계수 (k_c)를 Table 3.4와 같이 고려한다.

Table 3.4 Coordinating coefficient depending on the duration of sunshine

Duration of sunshine (h)	3.0	4.5	6.0	7.5	9.0
k_c	3,020	2,820	2,620	2,420	2,220

HDH는 난방기간 동안 난방설정온도와 외기온과의 온도차를 적산한 것으로 아래 식 (3.9)로 구한다.

$$HDH = \sum_{i=1}^n \left[\int_{t_1}^{t_2} (T_{in} - T_o) \right]_i \quad (3.10)$$

T_{in} 은 실내 설정온도(℃), T_o 은 외기온(℃), t 는 hour, i 는 day 이고, $T_{in} < T_o$ 이면 $T_{in} - T_o = 0$ 이다. 온실의 최대난방부하는 작물재배 기간의 최저 설계 외기온 하에서 온실로부터 손실되는 열량으로 관류열 부하, 틈새환기전열부하 및 지중전열부하로 구성되며 아래 식 (3.10)과 같다.

$$H_T = (H_W + H_V + H_S)f_w \quad (3.11)$$

H_W 는 관류열부하(W), H_V 는 틈새환기전열부하(W), H_S 는 지중전열부하(W), f_w 는 풍속보정계수이다. 관류열부하는 아래 식 (3.11)과 같다.

$$H_W = UA_c(T_{i,n} - T_{out}) \quad (3.12)$$

여기서, U 는 열관류율 ($W/m^2\text{℃}$), A_c 는 온실의 피복면적 (m^2), T_{in} 은 실내설정온도 ($℃$), T_{out} 는 설계외기온 ($℃$)이다. 틈새환기전열부하는 아래 식 (3.12)와 같다.

$$H_V = \rho_i c_p N_m V(T_i - T_o) \quad (3.13)$$

여기서, ρ_i 는 실내공기의 밀도 (kg/m^3), c_p 는 실내공기의 비열 ($J/kg\text{℃}$), N_m 은 틈새환기율 (회/s), V 는 온실의 체적 (m^3), $T_i - T_o$ 는 실내외 기온차 ($℃$)이다. 지중전열부하는 아래 식 (3.13)과 같다.

$$H_s = F_L L_s (\Delta T - \theta) \quad (3.14)$$

여기서, F_L 는 온실의 외주부 단위길이당 열손실계수($W/m\text{℃}$), L_s 는 온실의 둘레길이 (m), ΔT 는 실내외 기온차 ($℃$), θ 는 부하경감

기준온도차 (°C)로 지중열류의 방향이 바뀌는 시점의 실내외 기온차 (°C)이다.

제 4 장 결과 및 고찰

4.1 시설재배온실 실내온도 모의 검증

본 연구에서는 실험 대상지 내에서 2011년 1월 27일부터 5월 31일까지 측정된 온도자료를 통해 온도 모델을 보정하였고, 2012년 2월 18일부터 4월 18일까지 측정된 자료를 통해 검정하였다. 아래 Table 4.1은 온도 모델의 보정 및 검정 결과를 나타내었으며, 모델의 성능은 R^2 (결정계수) MAE (평균절대오차), RMSE (평균제곱근오차)를 이용해 평가하였다. 보정 기간 평가 결과 0.69, 2.77, 3.72를, 검정 기간에는 0.57, 2.67, 3.86를 보였다. 이때, 검정 시 내부 설정온도는 최저 12℃로, 보정 시 내부 설정온도는 최저 11℃로 설정했으며, 이는 온실 실측자료를 바탕으로 정하였다. 시설재배 온실의 실내온도를 모의한 기존 연구들 중에서 Ha et al. (2015)는 유리온실에서 BES 모델을 이용해 1.1~2.6℃의 평균 절대오차를 보였으며, 이승노 등 (2016)은 플라스틱 온실에서 BES 모델을 이용하여 결정계수 0.85 이상의 값을 얻었다. 두 연구는 개별 온실 해석에 뛰어난 장점을 가지고 있으나, BES 모델에 적용을 위해 실험 온실의 형상을 모델링해야 하는 등 본 연구와 같이 대단위 온실을 간단하게 해석하는 데에는 무리가 있다. 또한, 평균절대오차를 기준으로 본 연구의 온도모델과 비교하였을 때 큰 차이를 보이지 않음을 알 수 있다.

Table 4.1 Evaluation results of simulated temperature for calibration (2011) and validation (2012)

Year	R^2	MAE	RMSE	r	Period	
					From	To
2011 (calibration)	0.69	2.77	3.72	0.82	27th	31st
					Jan	May
					2011	2011
2012 (validation)	0.57	2.67	3.86	0.72	18th	18th
					Feb	Apr
					2012	2012

아래 Fig. 4.1은 보정기간 실내온도 모의치와 실측치의 산포도를 나타내고, Fig. 4.2는 검정기간 산포도를 나타낸다. Fig. 4.1과 Fig. 4.2를의 x축은 실측값을, y축은 모의값을 나타내며, 상관계수는 각각 0.82와 0.72로 계산되었다. Fig. 4.1을 살펴보면 온도모델의 최소 설정온도인 11 ℃ 근처로 모의 값들이 많이 분포하는 것을 확인할 수 있는데, 이는 연구대상지와 같은 실제 시설재배지에서는 설정온도를 기준으로 증감이 있는 반면, 모델에서는 이를 충분히 모의하지 못했기 때문인 것으로 분석되었다. 또한, 일부 중심으로부터 먼 곳에 위치한 점들은 수원 기상관측소의 일사량 자료와 실험 대상지의 기상과 차이가 있던 시기에 발생한 오차로 판단된다.

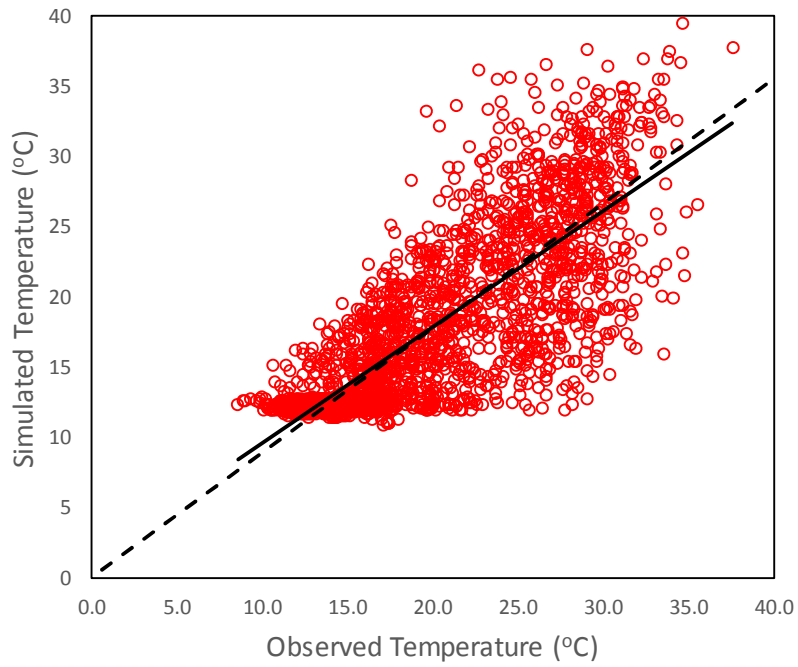


Fig. 4.1 Scatter plots of the observed and simulated temperature in the experimental greenhouse for calibration (2011)

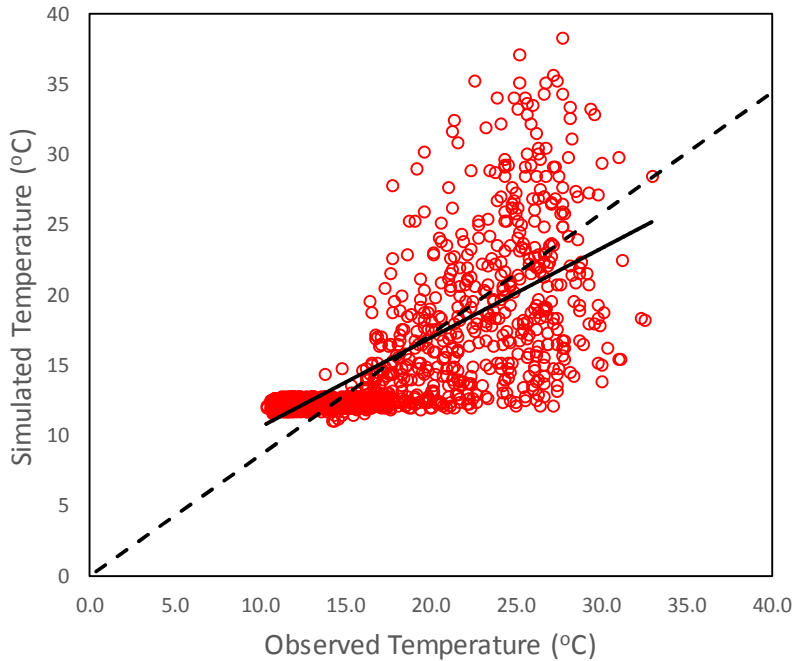


Fig. 4.2 Scatter plots of the observed and simulated temperature in the experimental greenhouse for validation (2012)

Fig. 4.3과 Fig. 4.4는 실측한 온실 내부온도와 외기온도 그리고 모의한 온실 내부온도를 시간 단위로 나타낸 그래프이다. 두 그림의 x축은 시간 단위이며 y축은 섭씨 기온을 나타낸다. Fig. 4.3은 보정기간인 2011년의 결과이며 최저 설정온도 11℃로 모의하였다. Fig. 4.4는 검정기간인 2012년의 결과이며 최저 설정온도 12℃로 모의하였다. Fig. 4.3을 통해 1~2월의 경우 온도가 과소 모의되고, 3~4월의 경우 과다 모의되는 경향이 있음을 확인할 수 있다. 이는 겨울철과 봄철에 태양복사량이 온도모의에 미치는 영향이 다르기

때문인 것으로 분석되었다. 두 그래프를 살펴보면 2월 16일과 3월 8일 사이 구간에서 모의값이 낮 시간대에 충분히 상승하지 않는 경우가 있는데, 이는 본 연구에서 사용한 관측소의 일사량 자료가 실험 대상지의 기상과 차이가 있었기 때문인 것으로 판단된다. 또한 모의값과 실측값이 최저값에서 보이는 분포를 비교해 볼 때, 실측값은 설정한 최저온도를 기준으로 비교적 큰 진폭의 분포를 보이는 반면 모의 값은 설정한 최저온도 값에 수렴하는 분포를 보인다. 실제 온실에서는 난방기를 통해 실내를 가온해주더라도 설정온도 부근에서 증감이 있다. 이때의 실내온도 변화가 그래프 상에서는 큰 진폭으로 반영된 것으로 보이며, 이로부터 최저온도의 오차가 발생한 것으로 판단된다.

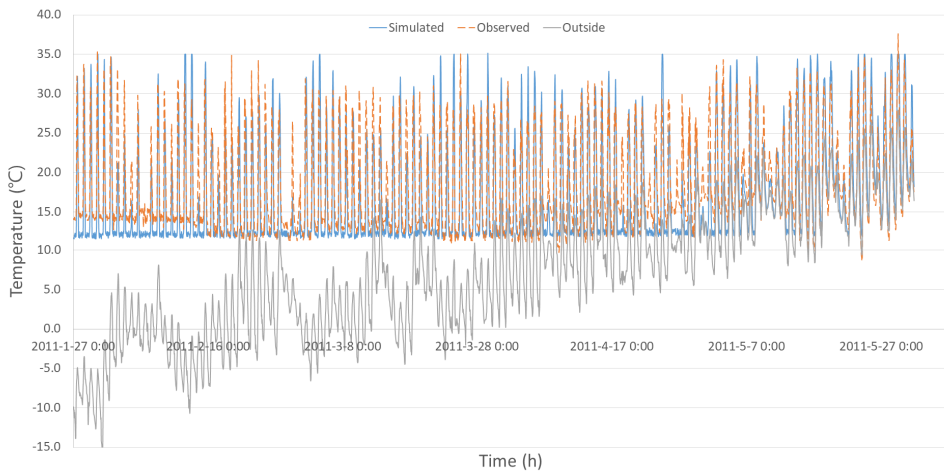


Fig. 4.3 Observed and simulated temperature in the experimental greenhouse for calibration (2011)

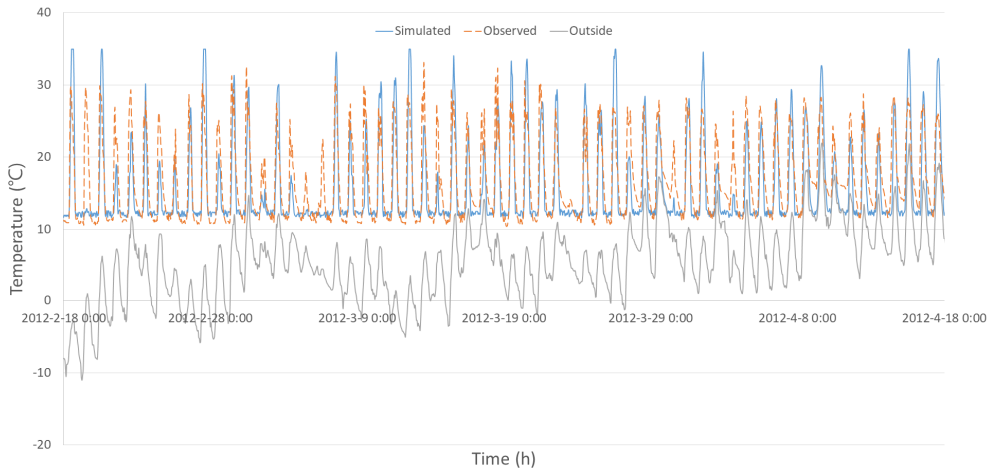


Fig. 4.4 Observed and simulated temperature in the experimental greenhouse for validation (2012)

4.2 기준작물증발산량 산정 검증

아래 Fig. 4.5는 Hargreaves식을 이용한 기준작물증발산량 산정의 타당성을 검증하기 위해 사용한 연구대상지의 토양수분함수량과 관개량을 나타낸 그래프이다. 그래프를 통해 10cm와 30cm에서 측정된 토양수분의 변동이 가장 큰 것을 알 수 있으며, 60cm와 90cm의 토양수분은 변동이 매우 적으며, 관개 시기 및 일정과는 상관성이 보이지 않는다. 관개는 7월 22일 처음 시작하여 11월 6일까지 이어졌으며, 일회 관개 시 3~4mm의 물을 주었다 (홍은미, 2013).

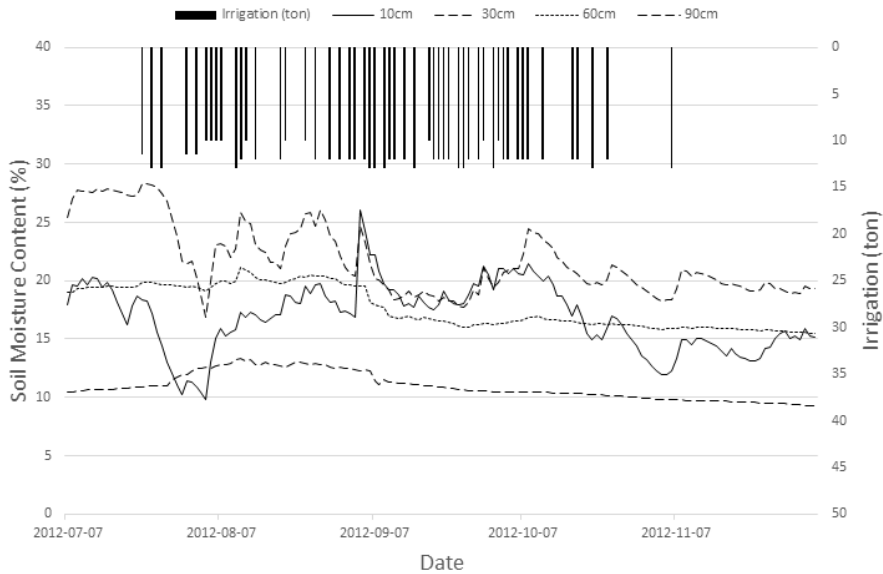


Fig. 4.5 Soil moisture content (%) and irrigated water (ton) in the experimental site from 7th July 2012 to 7th November 2012

본 연구에서는 일별 토양물수지를 분석하기 위하여 관개를 시작한 7월 22일부터 10월 28일까지 자료를 이용하였다. 측정된 토양수분함수량과 관개량 자료를 이용하여 작물의 증발산량을 계산하였고, 이로부터 Hargreaves식을 이용한 기준작물증발산량과 작물계수를 고려하여 산정한 작물증발산량 값과 비교하였다. 아래 Fig. 4.6은 두 가지 방법을 통해 산정한 작물증발산량을 누적 곡선을 이용하여 나타내었고, Table 4.2는 관개량과 두 가지 방법을 통해 산정한 작물증발산량 값을 주 단위로 누적한 값을 나타낸다. 그래프를 통해 본 연구에서 적용한 실내온도 기반의 작물증발산량 산정값과 토양물수지를 이용하여 계산한 값이 큰 차이를 보이지 않음을 알 수 있다. 다만, Hargreaves 식은 일 단위의 작물

증발산량을 산정하는 반면, 실제 영농 시에는 관개를 2~3일에 한 번 하는 등 하루단위의 규칙적인 관개가 이뤄지지 않아 토양 물수지 방법은 작물 증발산량이 일별로 고르게 나타나지 않는다. 또한, 관개수가 토양 속에서 재분배되는 시간의 차이로 토양물수지를 이용한 누적 곡선은 Hargreaves식을 이용한 산정값에 비해 변화가 큰 분포를 보였다. Hargreaves식을 이용한 작물증발산량은 2012년 7월 22일부터 10월 28일까지 총 543mm로 계산되었고, 토양 물수지 방법은 640mm가 계산되었다. Hargreaves식을 이용한 기준작물증발산량 산정이 과소 모의되었으나, 실제 시설재배 온실에서는 침투량이 존재하기 때문에 오차는 더 작을 것으로 보인다.

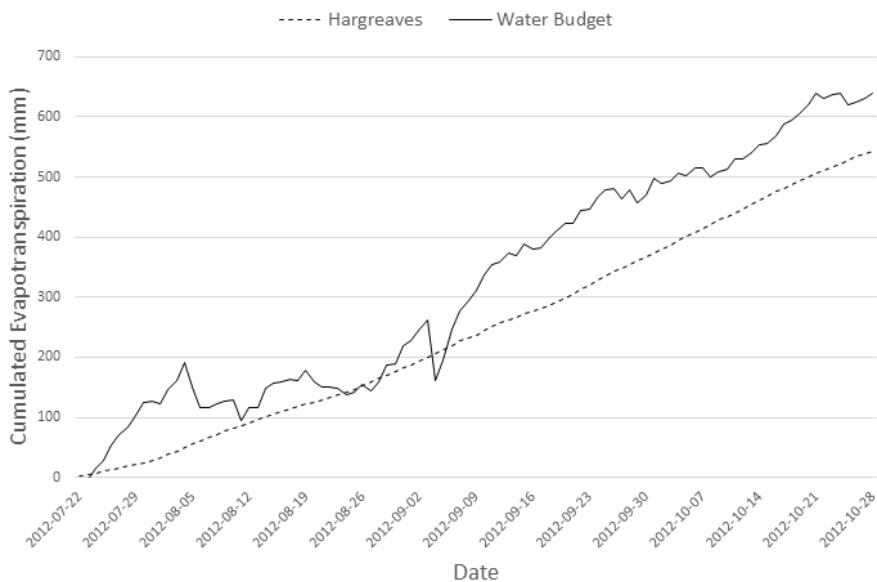


Fig 4.6 Comparison of cumulated ET_c using Hargreaves ET_r and water budget analysis (22nd July 2012 - 28th October 2012)

Table 4.2 Weekly cumulated value of irrigation water and ET_c in experimental greenhouse (2012)

Date	Irrigation (ton)	Hargreaves (mm)	Water Budget (mm)
7/22	12	2.4	-6.2
7/29	38	21.9	102.8
8/5	82	55.6	150.5
8/12	137	90.3	116.7
8/19	161	122.1	178.8
8/26	193	153.3	155.1
9/2	229	194.3	245.3
9/9	292	236.9	311.7
9/16	341	276.2	380.6
9/23	399	319.6	447.0
9/30	459	366.1	469.5
10/7	530	414.9	515.4
10/14	554	460.8	553.5
10/21	591	505.5	638.6
10/28	603	543	639.6

4.3 지역별 기준작물증발산량 및 기간난방부하 산정

본 연구에서는 2011 ~ 2012년과 온실의 조건을 동일하게 가정한 후, 2013년부터 2017년까지의 기상자료를 이용하여 온실 내에서 기준작물증발산량과 난방 에너지 부하를 산정하였다. Fig. 4.7은 온실 내부 최저 설정온도를 12℃로 고정하고, 2013년 기상자료를 바탕으로 국내 지역별 기준작물증발산량과 난방 에너지 부하를 산정한 결과를 나타낸다. 그래프를 통해 난방 에너지 부하는 중부지역에 위치한 춘천, 수원이 각각 3,757GJ, 2,897GJ로 높게 모의되었으며, 남부 지역에 위치한 대구와 광주가 1,894GJ, 1,882GJ로 낮게 모의되었다. 가장 크게 모의된 춘천은 가장 적게 모의된 광주에 비해 약 2배 더 크게 모의되었다. 기준작물증발산량은 지역의 위치에 따라 유의미한 상관성을 보이지는 않았다.

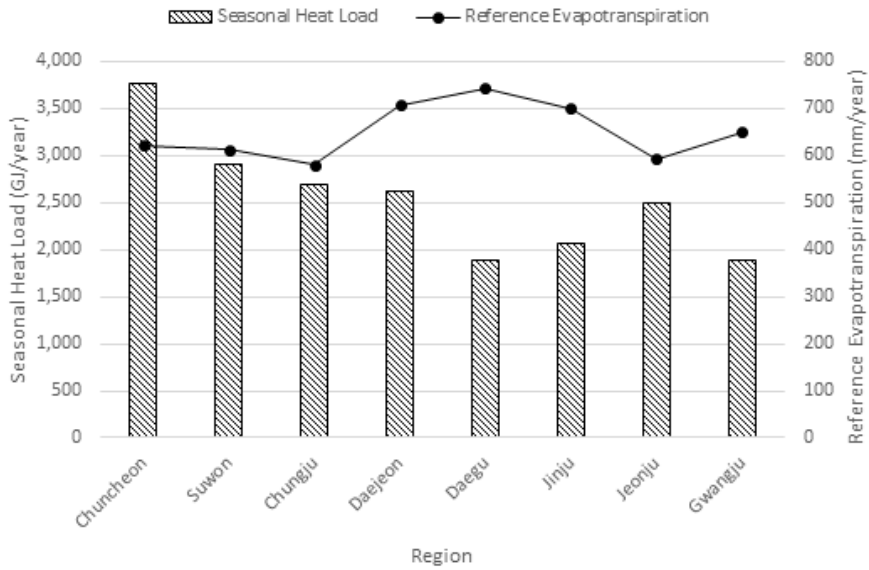


Fig. 4.7 Regional estimation of Hargreaves ET_r and seasonal heat load

Fig. 4.8은 춘천지역에서 2013년의 기상자료를 이용하여 최저 설정온도에 따른 기준작물증발산량과 난방 에너지 부하를 산정한 결과를 나타낸다. 그래프를 통해 난방에너지 부하는 최저설정온도 18℃에서 7,031GJ, 12℃에서 3,657GJ로 모의되었으며, 18℃에서 약 1.9배 더 크게 모의되었다. 기준작물증발산량의 경우 최저설정온도의 증가에 따라 조금씩 증가하였으나 큰 차이를 보이지는 않았다.

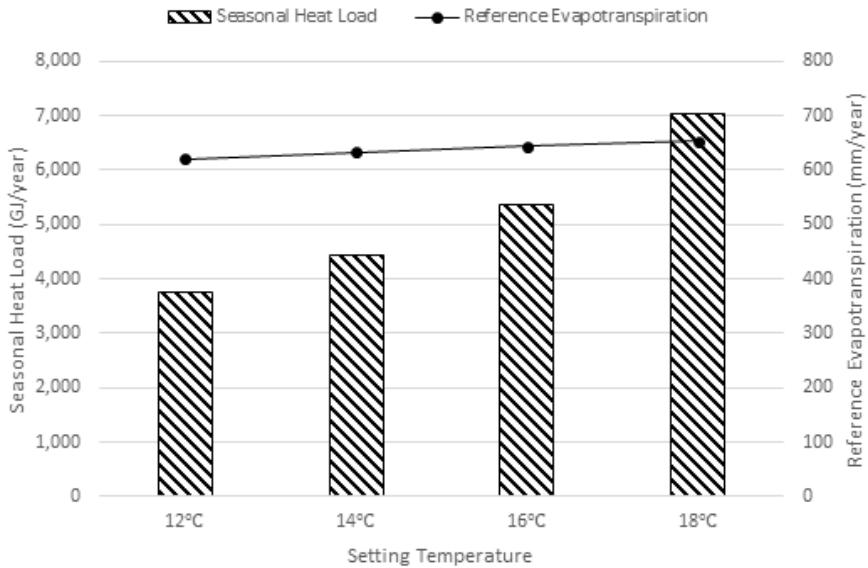


Fig. 4.8 Estimation of Hargreaves ET_r and seasonal heat load depending on the setting temperature

Fig. 4.9는 온실 내부 최저 설정온도를 14°C로 고정하고, 춘천 지역을 대상으로 2013년부터 2017년까지 연도별로 기준작물증발산량과 난방 에너지 부하를 산정한 결과를 나타낸다. 난방 에너지 부하는 가장 크게 모의된 2013년의 경우 3,757GJ이 계산되었고, 가장 적게 모의된 2017년의 2,742GJ에 비해 약 1.4배 더 크게 모의되었다. 기준작물증발산량의 경우 큰 차이를 보이지 않았다.

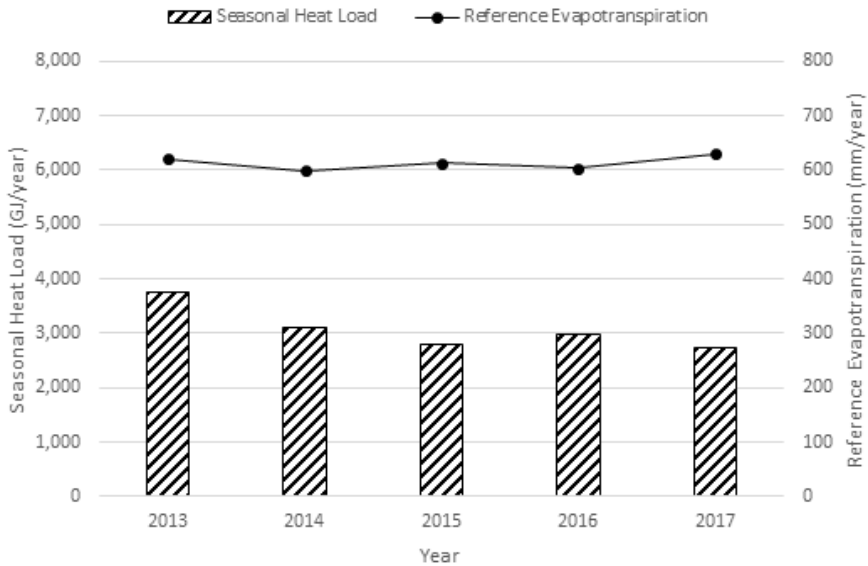


Fig. 4.9 Yearly estimation of Hargreaves ET_r and seasonal heat load

최저 설정온도와 연도별 기상자료 그리고 지역에 따른 난방 에너지 부하와 기준작물증발산량의 차이를 모의한 결과를 통해 시설재배지에서는 기준작물증발산량이 여러 조건에 대해 큰 변화를 보이지 않음을 알 수 있고, 난방 에너지 부하의 경우 지역과 최저 설정온도의 변화에서 가장 큰 차이를 보였으며 연도별로도 적지 않은 차이를 보였다.

아래 Fig. 4.10 ~ Fig. 4.17은 최저 설정온도와 연도별 기상자료에 따른 지역별 기준작물증발산량과 난방 에너지 부하를 나타내었다. Fig. 4.10부터 Fig. 4.17까지 순서대로 춘천, 수원, 청주, 대전, 대구, 전주, 광주, 전주의 모의 결과를 나타낸다. 그래프의 x축은 사용한 기상자료의 연도를 의미하며, y축의 기본 축은 난방에너지 부하

(GJ/year)를, y축의 보조 축은 기준작물증발산량 (mm/year)를 의미한다. 최저 설정온도의 변화에 따라 8개 지역에서 모두 기준작물증발산량과 난방 에너지 부하의 변화가 일정한 분포를 보였으며, 난방 에너지의 경우 가장 높거나 낮게 산정된 연도가 지역별로도 다른 것을 확인할 수 있다. Fig. 4.15을 통해 2016년, 2017년의 기준작물증발산량 값이 다른 지역과 연도에 비해 작게 산정된 것을 확인할 수 있는데, 이는 외기의 최대·최소 기온 차이가 작아 발생한 것으로 보인다.

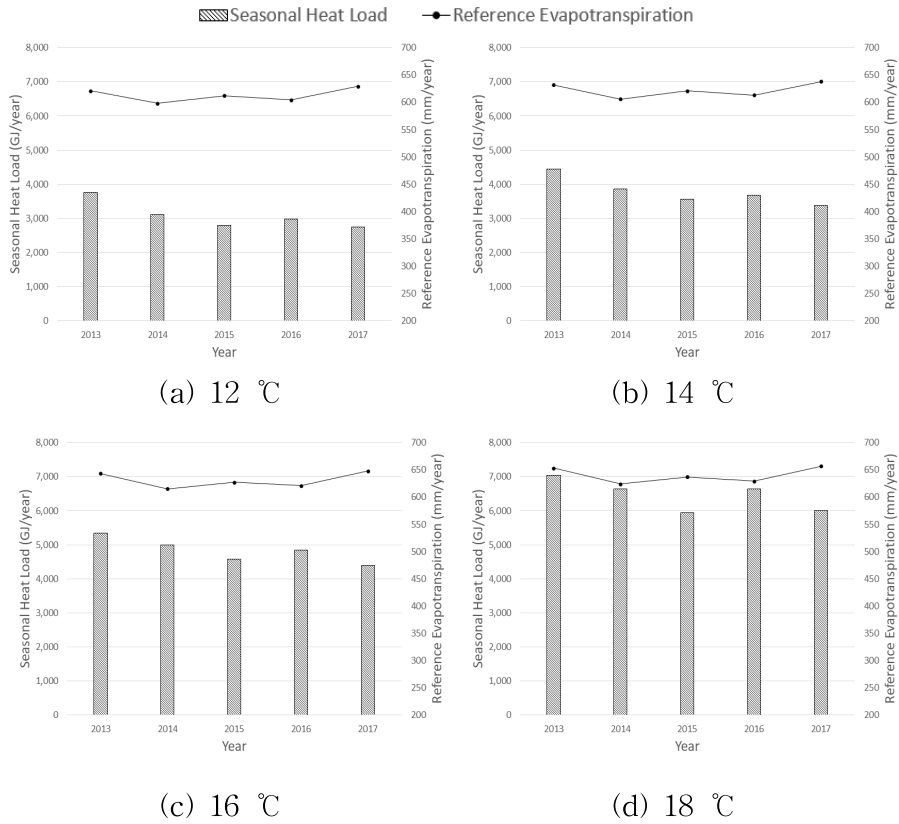


Fig. 4.10 Estimation of Hargreaves ET_r and seasonal heat load in Chuncheon from 2013 to 2017 depending on the minimum temperature setting (12, 14, 16, 18 °C)

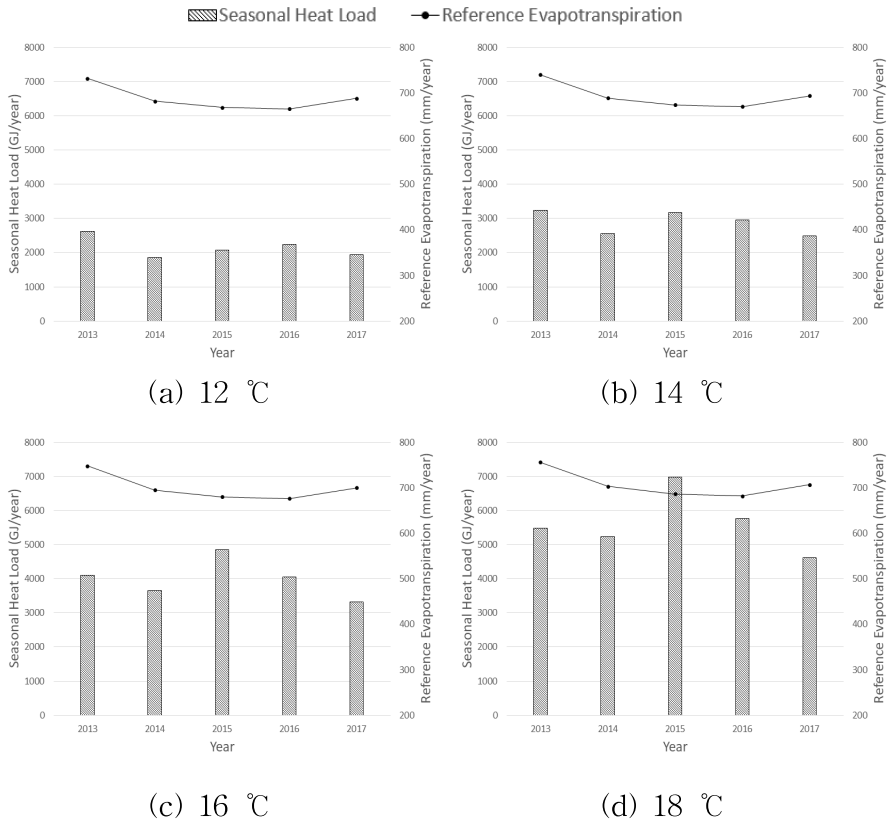


Fig. 4.11 Estimation of Hargreaves ET_r and seasonal heat load in Suwon from 2013 to 2017 depending on the minimum temperature setting (12, 14, 16, 18 °C)

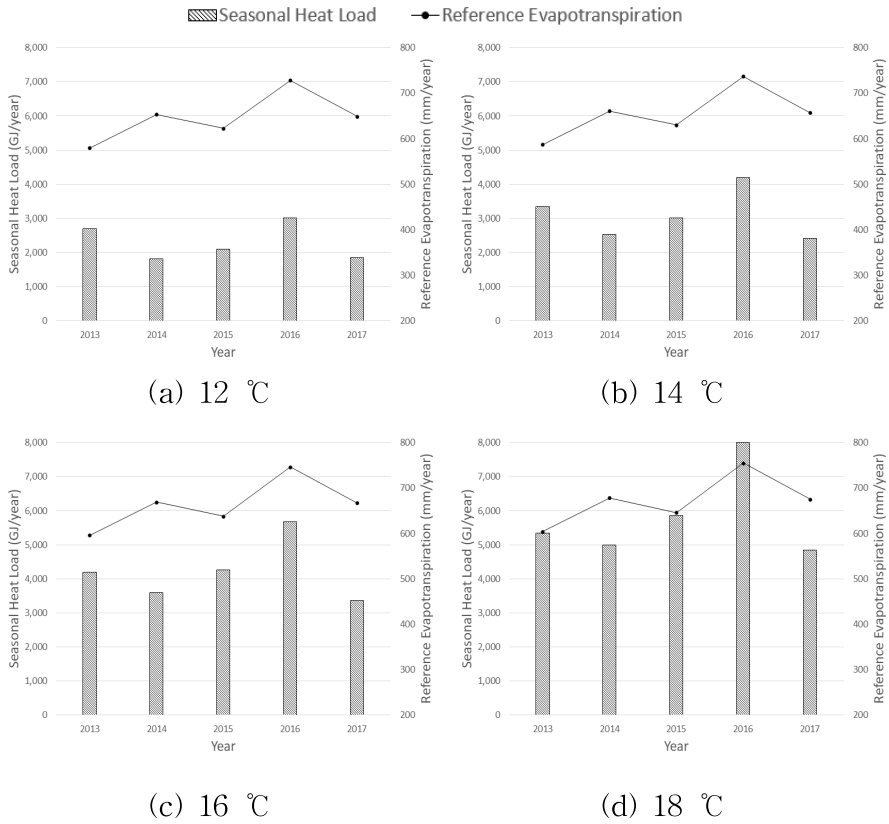


Fig. 4.12 Estimation of Hargreaves ET_r and seasonal heat load in Cheongju from 2013 to 2017 depending on the minimum temperature setting (12, 14, 16, 18 °C)

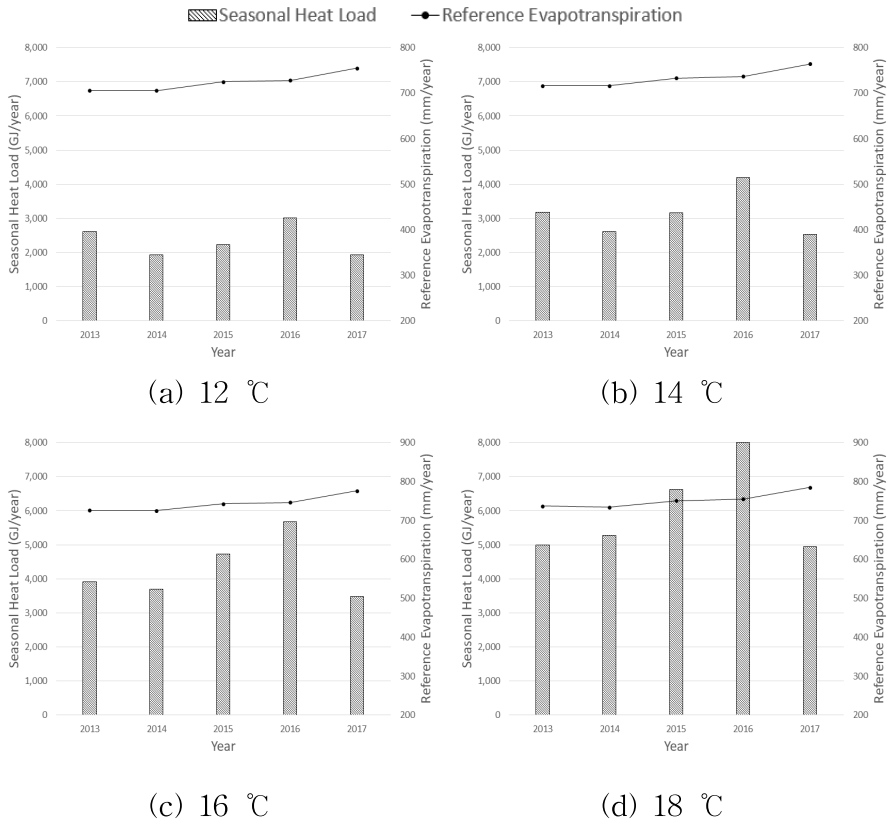


Fig. 4.13 Estimation of Hargreaves ET_r and seasonal heat load in Daejeon from 2013 to 2017 depending on the minimum temperature setting (12, 14, 16, 18°C)

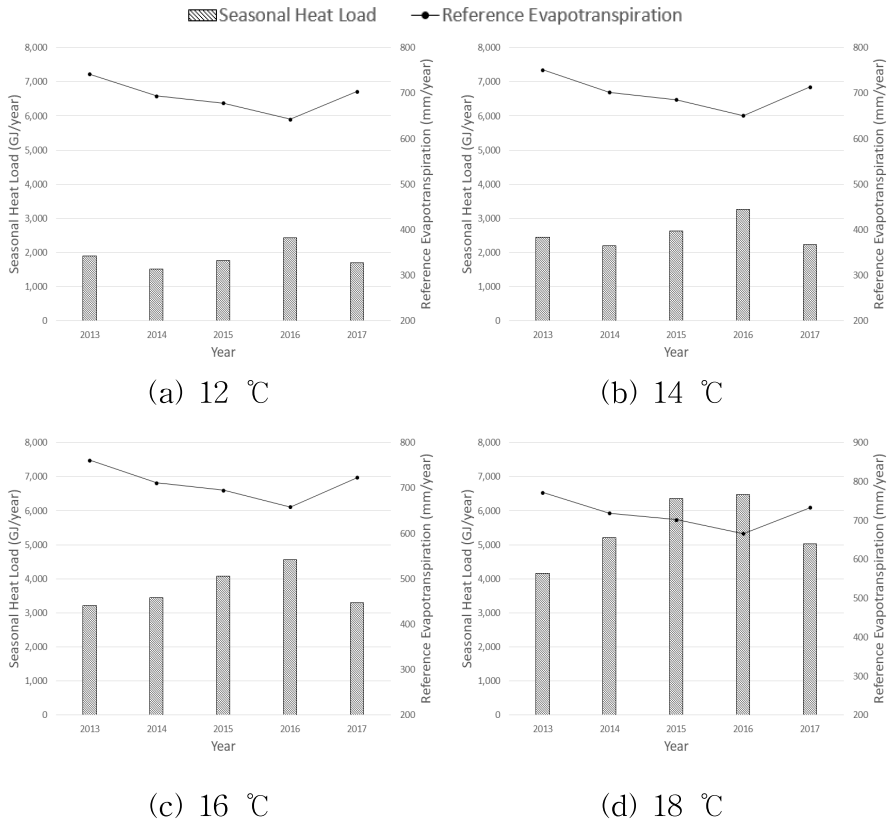


Fig. 4.14 Estimation of Hargreaves ET_r and seasonal heat load in Daegu from 2013 to 2017 depending on the minimum temperature setting (12, 14, 16, 18 °C)

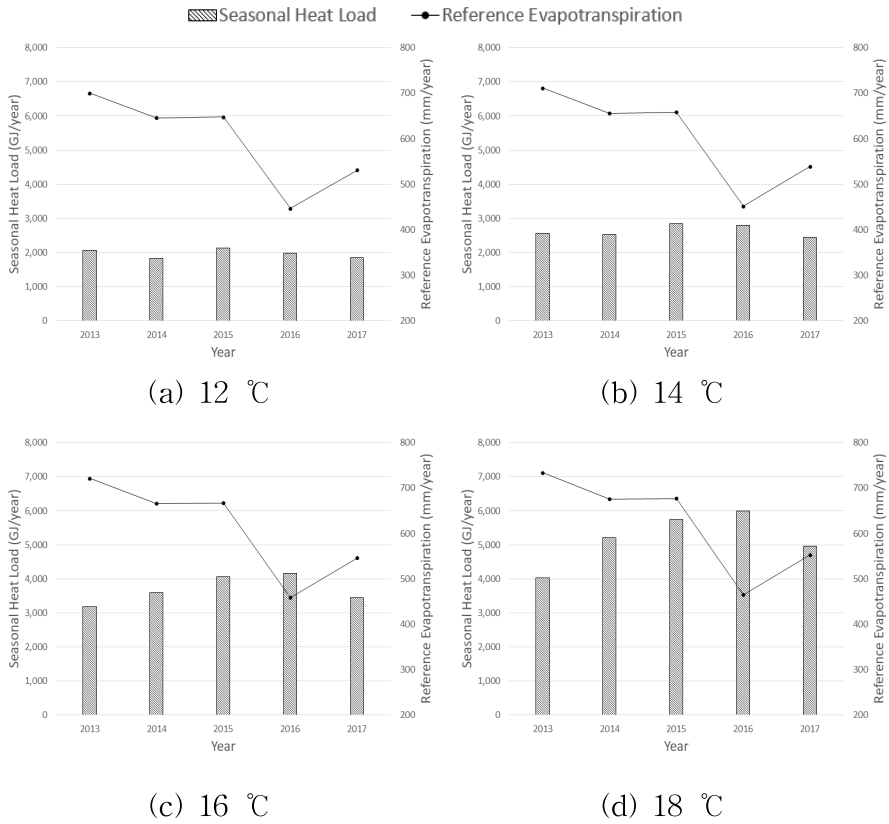


Fig. 4.15 Estimation of Hargreaves ET_r and seasonal heat load in Jinju from 2013 to 2017 depending on the minimum temperature setting (12, 14, 16, 18 °C)

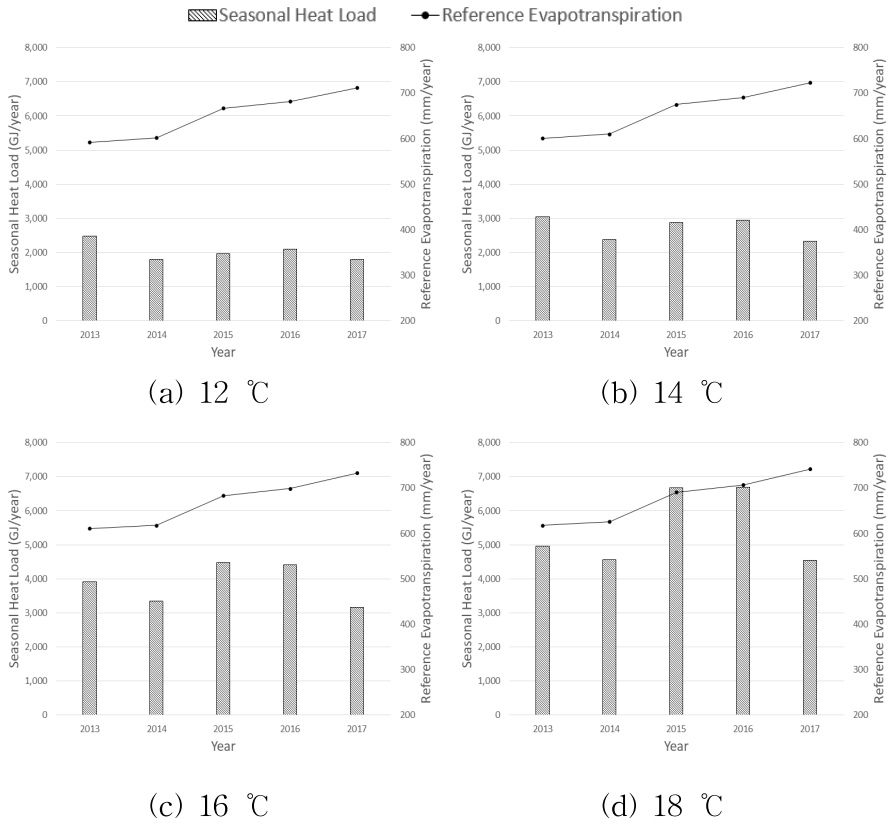


Fig. 4.16 Estimation of Hargreaves ET_r and seasonal heat load in Jeonju from 2013 to 2017 depending on the minimum temperature setting (12, 14, 16, 18 °C)

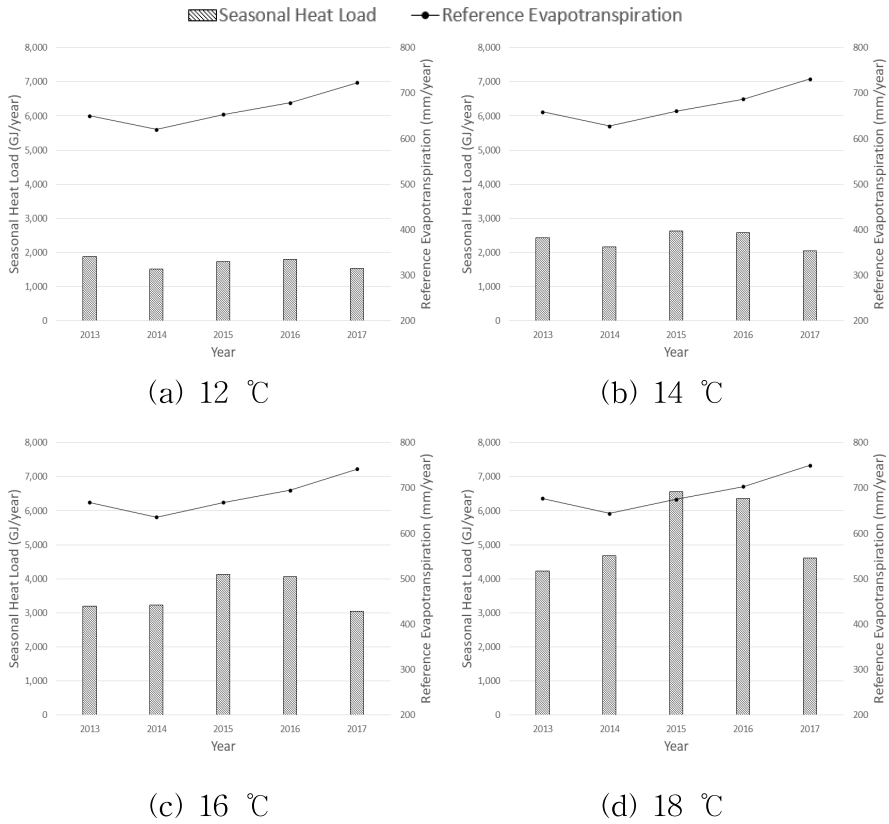


Fig. 4.17 Estimation of Hargreaves ET_r and seasonal heat load in Gwangju from 2013 to 2017 depending on the minimum temperature setting (12, 14, 16, 18 °C)

4.4 지역별 물-에너지 관계 평가

Table 4.2부터 Table 4.9까지는 기준작물증발산량을 작물계수를 고려하지 않고 재배 면적을 곱해 산정한 값과 난방 에너지 부하의 관계를 지역별로 나타내었으며, Fig. 4.18부터 Fig. 4.25까지는 그 값을 나타낸 그래프이다. 그래프를 살펴보면 최저 설정온도의 증가에 따라 물에 대한 에너지의 값이 커지는 양상을 보이는 것을 알 수 있다. 또한 지역에 따라 가장 큰 값을 보이는 연도가 조금씩 다른 것을 통해 같은 연도에도 지역에 따라 온실에서의 자원 관계가 달라질 수 있음을 알 수 있다.

Table 4.3 Calculated value of Water-energy relationship (GJ/ton) in Chuncheon from 2013 to 2017

	2013	2014	2015	2016	2017
12℃	2.0	1.7	1.5	1.6	1.5
14℃	2.3	2.1	1.9	2.0	1.8
16℃	2.8	2.7	2.4	2.6	2.3
18℃	3.6	3.5	3.1	3.5	3.0

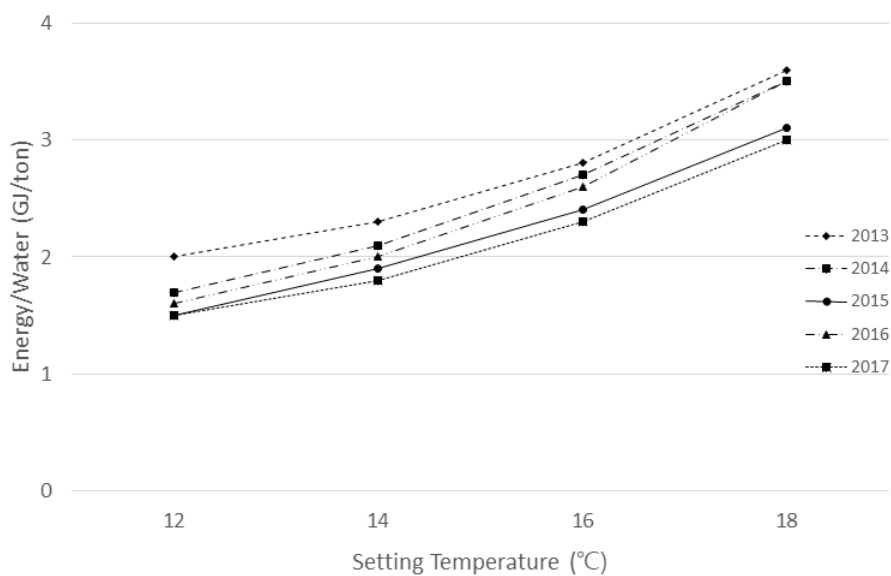


Fig 4.18 Water-energy relationship (GJ/ton) in Chuncheon depending on the temperature settings and year

Table 4.4 Calculated value of Water-energy relationship (GJ/ton) in Suwon from 2013 to 2017

	2013	2014	2015	2016	2017
12℃	1.2	0.9	1.0	1.1	0.9
14℃	1.5	1.2	1.6	1.5	1.2
16℃	1.8	1.8	2.4	2.0	1.6
18℃	2.4	2.5	3.4	2.8	2.2

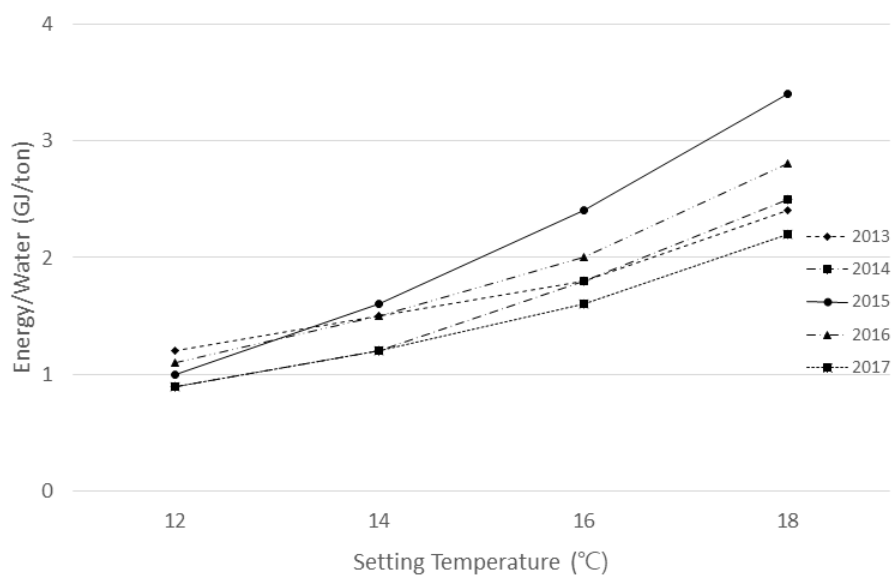


Fig 4.19 Water-energy relationship (GJ/ton) in Suwon depending on the temperature settings and year

Table 4.5 Calculated value of Water-energy relationship (GJ/ton) in Cheongju from 2013 to 2017

	2013	2014	2015	2016	2017
12℃	1.5	0.9	1.1	1.4	0.9
14℃	1.9	1.3	1.6	1.9	1.2
16℃	2.3	1.8	2.2	2.5	1.7
18℃	2.9	2.5	3.0	3.5	2.4

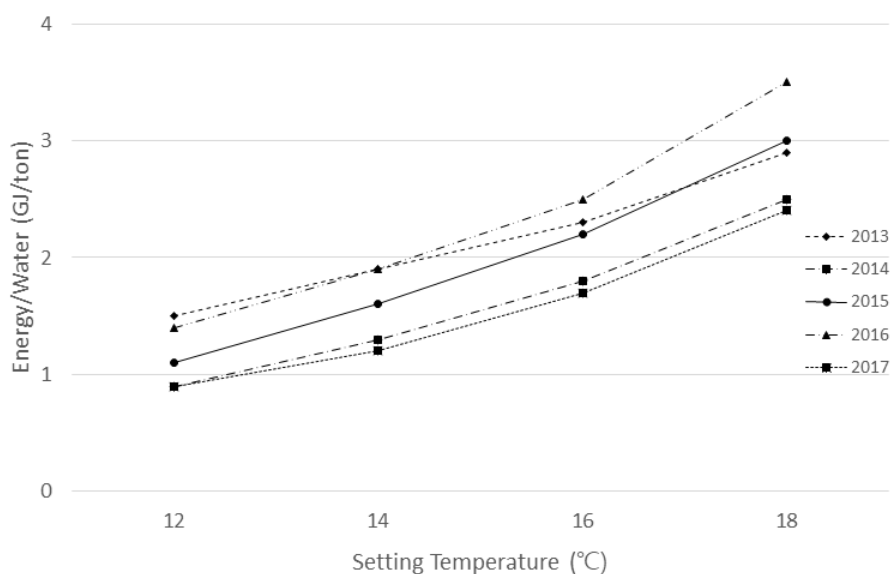


Fig 4.20 Water-energy relationship (GJ/ton) in Cheongju depending on the temperature settings and year

Table 4.6 Calculated value of Water-energy relationship (GJ/ton) in Daejeon from 2013 to 2017

	2013	2014	2015	2016	2017
12℃	1.2	0.9	1.0	1.4	0.9
14℃	1.5	1.2	1.4	1.9	1.1
16℃	1.8	1.7	2.1	2.5	1.5
18℃	2.3	2.4	2.9	3.5	2.1

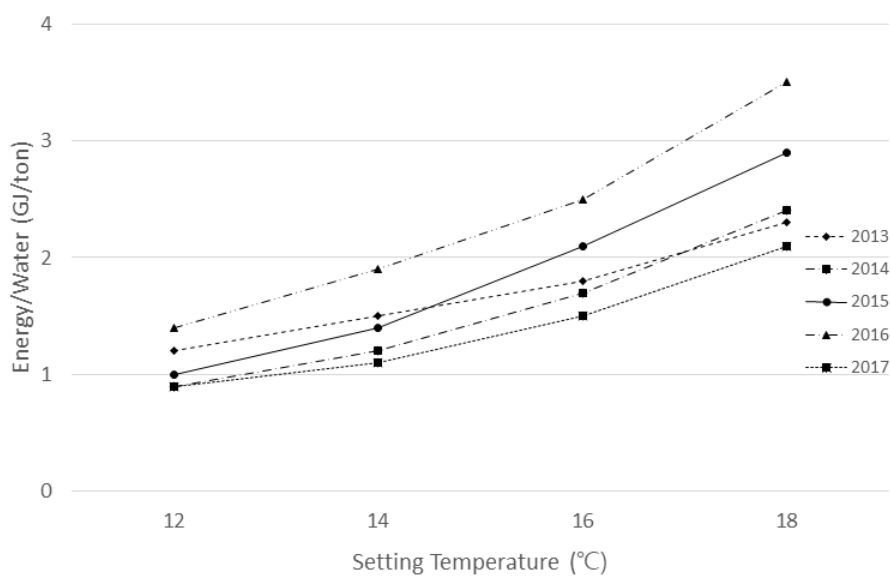


Fig 4.21 Water-energy relationship (GJ/ton) in Daejeon depending on the temperature settings and year

Table 4.7 Calculated value of Water-energy relationship (GJ/ton) in Daegu from 2013 to 2017

	2013	2014	2015	2016	2017
12℃	0.9	0.7	0.9	1.3	0.8
14℃	1.1	1.0	1.3	1.7	1.0
16℃	1.4	1.6	2.0	2.3	1.5
18℃	1.8	2.4	3.0	3.2	2.3

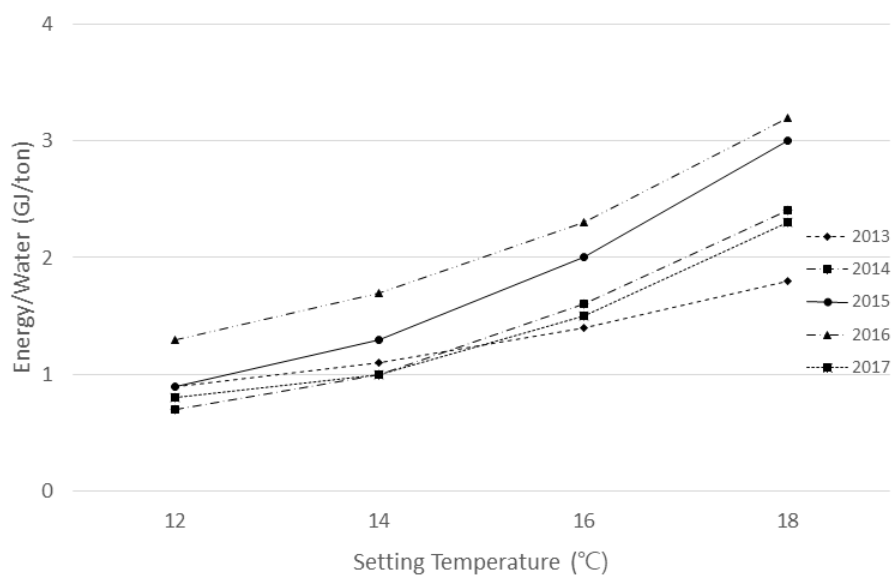


Fig 4.22 Water-energy relationship (GJ/ton) in Daegu depending on the temperature settings and year

Table 4.8 Calculated value of Water-energy relationship (GJ/ton) in Jinju from 2013 to 2017

	2013	2014	2015	2016	2017
12℃	1.0	0.9	1.1	1.5	1.2
14℃	1.2	1.3	1.4	2.1	1.5
16℃	1.5	1.8	2.0	3.0	2.1
18℃	1.8	2.6	2.8	4.3	3.0

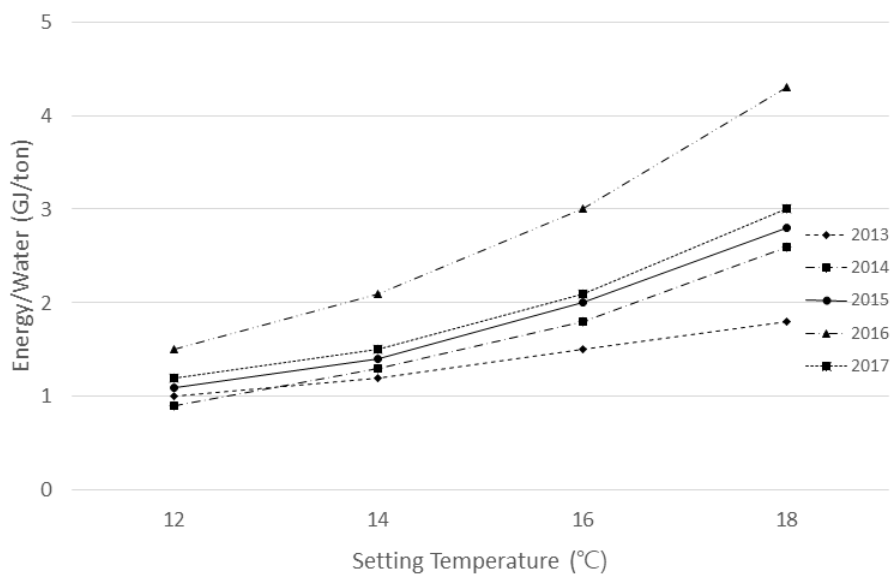


Fig 4.23 Water-energy relationship (GJ/ton) in Jinju depending on the temperature settings and year

Table 4.9 Calculated value of Water-energy relationship (GJ/ton) in Gwangju from 2013 to 2017

	2013	2014	2015	2016	2017
12℃	1.0	0.8	0.9	0.9	0.7
14℃	1.2	1.2	1.3	1.3	0.9
16℃	1.6	1.7	2.1	1.9	1.4
18℃	2.1	2.4	3.2	3.0	2.1

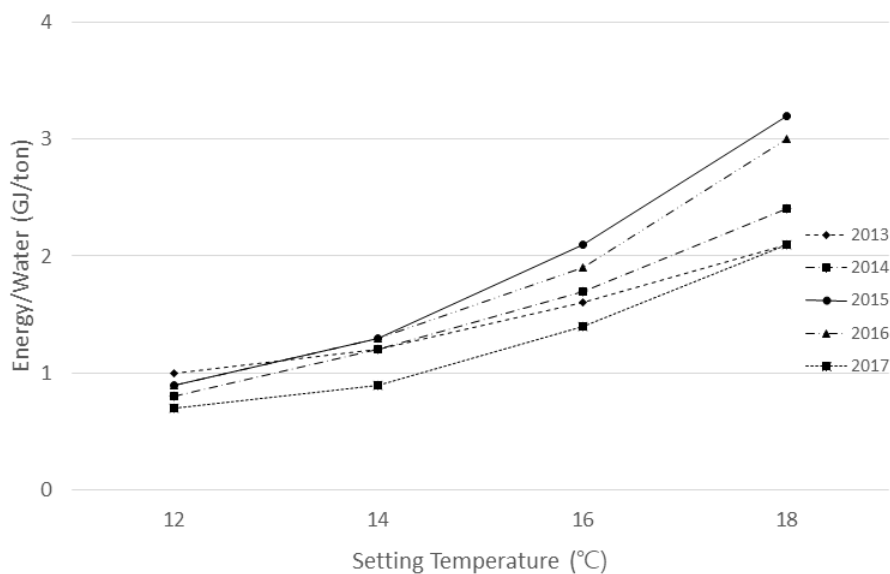


Fig 4.24 Water-energy relationship (GJ/ton) in Gwangju depending on the temperature settings and year

Table 4.10 Calculated value of Water-energy relationship (GJ/ton) in Jeonju from 2013 to 2017

	2013	2014	2015	2016	2017
12℃	1.4	1.0	1.0	1.0	0.8
14℃	1.7	1.3	1.4	1.4	1.1
16℃	2.1	1.8	2.2	2.1	1.4
18℃	2.7	2.4	3.2	3.2	2.0

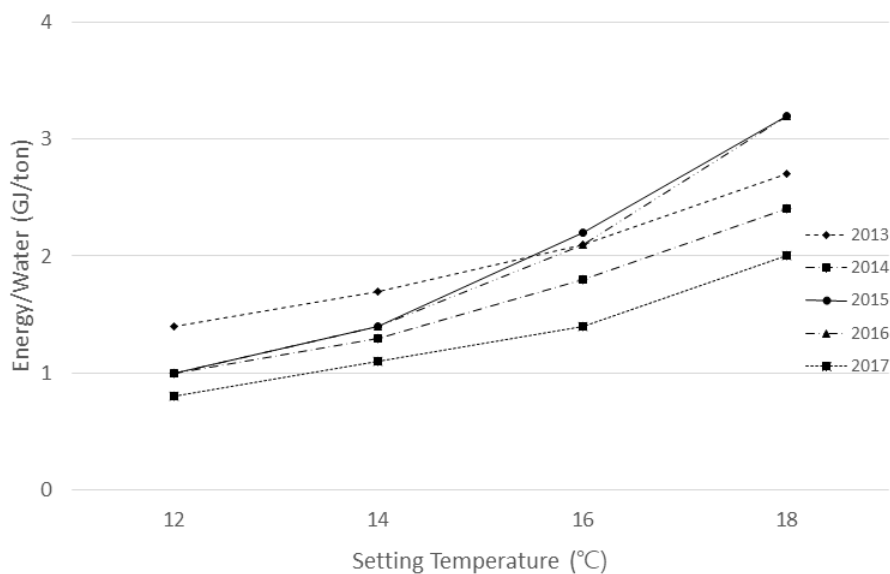


Fig 4.25 Water-energy relationship (GJ/ton) in Jeonju depending on the temperature settings and year

제 5 장 요약 및 결론

본 연구는 지역 단위로 시설재배 온실에서 에너지와 물의 관계를 분석하기 위해 기준작물증발산량과 난방 에너지 부하를 산정하였고, 이를 위해 온실의 실내온도를 모의하였다.

1. 시설재배지의 실내온도 모의를 위한 연구대상지는 경기도 용인시 남사면 진목리에 위치한 4연동 1-2W형 온실이다. 실내온도 모의를 위해 수원 기상관측소에서 시간별로 측정된 일사량, 풍속, 외부 기온 자료를 이용하였고, 온실의 지상 면적, 피복 면적, 관류열 손실 등의 온실 제원을 모의에 이용하였다.

2. 모델의 보정을 위해 2011년 1월 27일부터 2011년 5월 31일까지의 자료를 이용하였고, 검정을 위해 2012년 2월 18일부터 2012년 4월 18일까지의 자료를 이용하였다. 모델을 평가하기 위해 R^2 , MAE, RMSE를 적용하였고, 보정기간에는 R^2 , MAE, RMSE 각각 0.69, 2.77, 3.72의 값을, 검정기간에는 각각 0.57, 2.67, 3.86의 값을 얻었다.

3. 실내온도 모의 결과값을 토대로 온실 내에서 Hargreaves식을 이용하여 기준작물증발산량을 산정하였고, 정강호 등 (2005)이 제안한 국내 시설재배지에서 토마토의 작물계수를 적용하여 작물증발산량을 산정하였다. 이후 2012년 7월부터 10월까지 측정된 토양수분함수량과 관개량 자료로 일별 토양 물수지 분석을 하였고, 이 값을 앞서 산정한 작물증발산량 값과 비교하였다. 비교 결과 같은 기간 동안 Hargreaves식을 이용하여 산정한 작물증발산량은 543mm 이고 토양 물수지 방법을 통해 구한 증발산량 값은

640mm로, Hargreaves식을 이용한 작물증발산량 계산이 시설재배지에서 적용 가능한 것으로 판단된다.

4. 시설재배지의 난방 에너지는 춘천의 경우 최저 설정온도를 12℃로 설정했을 때 2013~2017년 기상자료를 바탕으로 모의 결과 최대 1.4배의 차이를 보였으며, 동일 연도에 최저 설정온도를 18℃까지 증가시켰을 때 평균 약 2.1배의 차이를 보였다. 지역별로는 동일한 조건에서 춘천이 광주에 비해 최대 약 1.8배 더 크게 모의되었다. 이로부터 시설재배지의 난방 에너지는 여러 가지 변수가 비슷하게 영향을 미치는 것으로 분석되었다.

5. 산정한 기준작물증발산량과 난방 에너지 부하를 바탕으로 시설재배지에서의 물과 에너지의 관계에 대해 분석하였고, 춘천의 경우 2015년도의 기상자료와 최저 설정온도 12℃에서 모의하였을 때 물과 에너지의 관계가 1.5GJ/ton으로 가장 작게 산정되었고, 2013, 2014, 2016년도에 최저 설정온도 18℃에서 3.5GJ/ton으로 가장 크게 산정되었다. 이로부터 물-에너지-식량 넥서스 분석에서 자원 간의 복잡한 관계를 보다 간단하게 평가할 수 있을 것이라 판단된다.

6. 본 연구의 결과는 시뮬레이션 기반의 물-에너지-식량 넥서스 분석에서 시설재배지에서의 물과 에너지 관계를 분석하는 데에 적용 가능할 것으로 판단되며, 나아가 향후 식량 모의를 위한 입력 자료로 사용이 가능할 것이라 생각된다. 또한 본 연구의 대상 온실 외의 다른 종류의 온실에서 측정한 자료를 통해 추가적인 보정이 이뤄진다면 더 나은 결과를 제시할 수 있을 것이라 생각하며, 그 결과로부터 시설재배단지에서 투입되는 자원 간의 관계를 간단하게 파악하고 최종적으로는 농업 시설재배 단지를 대상으로 한 정책

평가 등에 이용이 가능할 것이라 판단된다.

참 고 문 헌

1. Allen, G., S. Pereira, D. Raes and M. Smith, 1998. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop requirements. Irrig. and Drain. Paper No. 56, FAO, Rome, Italy.
2. Bot, G. P. A., 1994. *Greenhouse climate: from physical process to a dynamic model. Ph.D. diss., Wageningen, the Netherlands: Wageningen Agricultural University.*
3. Chen, L., S. Du, Y. He, M. Liang and D. Xu, 2018. Robust model predictive control for greenhouse temperature based on particle swarm optimization. *Information Processing in Agriculture* (2018). doi: 10.1016/j.inpa.2018.04.003.
4. Chen, M., P. Kaur, B. Dien, F. Below, M. Vincent and V. Singh, 2013. Use of tropical maize for bioethanol production. *World Journal of Microbiology and Biotechnology* 29(8): 1509-1515.
5. Choi, J., 2017. Sustainable resource management with Water-Energy-Food Nexus. *World Agriculture* 206: 3-19 (in Korean).
6. Daher, B. T. and R. H. Mohtar, 2015. WEF Nexus Tool 2.0; guiding integrative resource planning and decision-making. *Water International* 40(5-6): 748-771. doi: 10.1080/02508060.2015.1074148.
7. Daher, B., S. Lee, V. Kaushik, J. Blake, M. H. Askariyeh, H.

- Shafieezadeh, S. Zamaripa and R. H. Mohtar, 2019. Towards bridging the water gap in Texas: A water-energy-food nexus approach. *Science of the Total Environment* 647: 449–463. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.07.398.
8. Degirmencioglu, A., R. H. Mohtar, B. T. Daher, G. Ozgunaltay-Ertugrul and O. Ertugrul, 2019. Assessing the sustainability of crop production in the Gediz basin, Turkey: A water, energy and food nexus approach. *Fresenius Environmental Bulletin* 28(4): 2511–2522.
 9. Doorenbos, J. and A.H. Kassam, 1979. Yield responseto water. Irrigation and Drainage Paper No. 33, FAO, Rome, Italy, 193pp.
 10. Fernandes, C., J. Cora and J. Araujo, 2003. Reference evapotranspiration estimation inside greenhouses. *Scientia Agricola* 60(3): 591–594.
 11. Fernandez, M. D., S. Bonachela, F. Orgaz, R. Thompson, J. C. Lopez, M. R. Granados, M. Gallardo and E. Fereres, 2010. Measurement and estimation of plastic greenhouse reference evapotranspiration in a Mediterranean climate. *Irrigation Science* 28: 497–509. doi: 10.1007/s00271-010-0210-z.
 12. Fingerman, K., G. Berndes, S. Orr, B. Richter and P. Vugteveen, 2011. Impact assessment at the bioenergy-water nexus. *Bioproducts and Biorefining* 5: 375–386. doi: 10.1002/bbb.294.
 13. Gavilan, P., N. Ruiz and D. Lozano, 2015. Daily forecasting of reference and strawberry crop evapotranspiration in

greenhouse in a Mediterranean climate based on solar radiation estimates. *Agricultural Water Management* 159: 307–317.

14. Gheewala, S., G. Berndes and G. Jewitt, 2011. The bioenergy and water nexus. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining* 5: 353–360. doi: 10.1002/bbb.295.
15. Ha, T., I. Lee, K. Kwon and S. Hong, 2015. Computation and field experiment validation of greenhouse energy load using BES (Building Energy Simulation) model. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering* 8(6): 116–127. doi: 10.3965/j.ijabe.20150806.2037.
16. Hargreaves, G., 1975. Moisture availability and crop production. *Transactions of ASAE* 18(5): 980 - 984.
17. Hargreaves, G. 1981. Responding to tropical climates. The 1980–81 food and climate review. In *The Food and Climate Forum* 29–32. Aspen Institute for Humanistic Studies, Boulder, Colo..
18. Hargreaves, G. and Samani, Z., 1982. Estimating potential evapotranspiration. *Journal of Irrigation and Drainage* 108(3): 225 - 230.
19. Hargreaves, G. and Samani, Z., 1985. Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Engineering in Agriculture* 1(2): 96 - 99.
20. Hargreaves, G., F. Asce and G. Allen, 2003. History and evaluation of Hargreaves evapotranspiration equation. *Journal*

- of Irrigation and Drainage Engineering 129(1): 53-63.
21. Hong, E. M., J. Choi, W. H. Nam, M. Kang and J. Jang, 2014. Soil moisture extraction characteristics of Cucumber crop in protected cultivation. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 56(2): 37-46. doi: 10.5389/KSAE.2014.56.2.037 (in Korean).
 22. Hong, S. W., A. K. Moon, S. Li and I. B. Lee, 2015. Data-based model approach to predict internal air temperature of greenhouse. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 57(3): 9-19. doi: 10.5389/KSAE.2015.57.3.009 (in Korean).
 23. Irabien, A. and R. C. Darton, 2016. Energy-water-food nexus in the Spanish greenhouse tomato production. *Clean Technol Environ Policy* 18: 1307-1316. doi: 10.1007/s10098-015-1076-9.
 24. IRENA, 2018. Global energy transformation: A roadmap to 2050. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
 25. JGHA, 2007. Handbook of protected horticulture 5th edition. Japan Greenhouse Horticulture Association. p.127-152.
 26. Kim, H., S. Yoon, E. Cho and J. Kim, 2015. A study on policy directions for the Water-Energy Nexus, 16-20. Sejong, Korea: Korea Environment Institute.
 27. Kim, M. K., S. J. Eek, S. W. Nam, I. H. Yu and D. G. Lee, 1992. Derivation of standard air temperature curve for greenhouse heating design and its application to heating degree hour. Korean Society for Bio-Environment Control

- 1(1): 21-22 (in Korean).
28. Kim, Y., K. Shim, M. Jung, I. Choi and K. Kang, 2016. Classification of agroclimatic zones considering the topography characteristics in South Korea. *Journal of Climate Change Research* 7(4) : 507-512. doi: 10.15531/KSCCR.2016.7.4.507 (in Korean).
 29. Lee, S., J. Choi, S. Yoo and S. Heo, 2018. Assessment of the impacts of rice self-sufficiency on national resources in Korea through Water-Energy-Food-Land Nexus approach. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 60(4): 93-103 (in Korean).
 30. Lee, S., R. H. Mohtar and S. Yoo, 2019. Assessment of food trade impacts on water, food and land security in the MENA region. *Hydrology and Earth System Sciences* 23: 557-572. doi: 10.5194/hess-23-557-2019.
 31. MAFRA (Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs), 2018. Agriculture, food and rural affairs statistics yearbook, 40-44; 88-89. Sejong, Korea (in Korean).
 32. Mihara, Y., M. Okada, and T. Takakura, 1980. Fundamental sand practices in greenhouse design. Yokendo Co. Ltd. Tokyo, Japan.
 33. Moazed, H., A. Ghaemi and M. Rafiee, 2014. Evaluation of several reference evapotranspiration methods: A comparative study of greenhouse and outdoor conditions. *Transactions of Civil Engineering* 38(C2): 421-437.

34. Nam, S., 2006. The effect of soil warming on the greenhouse heating load. *Journal of the Korean Society of agricultural engineers* 48(5): 51-60 (in Korean).
35. Nam, S., H. Shin, and D.U. Seo, 2014. Comparative analysis of accumulated temperature for seasonal heating load calculation in greenhouses. *Protected Horticulture and Plant Factory* 23(3): 192-198 (in Korean).
36. Nam, S., D. Seo and H. Shin, 2015. Empirical analysis on the cooling load and evaporation efficiency of fogging system in greenhouse. *Protected Horticulture and Plant Factory* 24(3): 147-152. doi: 10.12791/KSBEC.2015.24.3.147 (in Korean).
37. Nam, S. and H. Shin, 2015. Development of a method to estimate the seasonal heating load for plastic greenhouse. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 57(5): 37-42. doi: 10.5389/KSAE.2015.57.5.037 (in Korean).
38. NAAS (National Academy of Agricultural Science), 2015. Standard for designing greenhouse environment, 71-84. Jeollabuk-do, Korea (in Korean).
39. Namany, S., T. Al-Ansary and R. Govindan, 2019. Sustainable energy, water and food nexus systems: a focused review of decision making tools for efficient resource management and governance. *Journal of Cleaner Production* 225: 610-626. doi: 10.1016/j.jclepro.2019.03.304.
40. Norrie, J., M. Graham and A. Gosselin, 1994. Potential evapotranspiration as a means of predicting irrigation timing

- in greenhouse tomatoes grown in peat bags. *Journal of American Society of Horticultural Science* 119(2): 163–168.
41. Orgaz, F., M. Fernandez, S. Bonachela, M. Gallardo and E. Fereres, 2005. Evapotranspiration of horticulture crops in an unheated plastic greenhouse. *Agricultural Water Management* 72: 81–96.
 42. Pittock, J., D. Dumaresq and A. Bassi, 2016. Modeling the hydropower–food nexus in large river basins: A Mekong case study. *Water* 8(10): 425. doi: 10.3390/w8100425.
 43. Raes, D., P. Steduto, T.C. Hsiao and E. Fereres, 2017. *AquaCrop Reference manual (Version 6.0)*, FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations)
 44. RDA (Rural Development Administration), 2018. 2017 Income analysis of agro and livestock products, 69–125. Jeollabuk-do, Korea (in Korean).
 45. Salmoral, G. and X. Yan, 2018. Food–energy–water nexus: A life cycle analysis on virtual water and embodied nergy in food consumption in the Tamar catchment, UK. *Resources, Conservation and Recycling* 133: 320–330. doi: 10.1016/j.resconrec.2018.01.018.
 46. Shang, Y., S., Lu, Y. Ye, R. Liu, L. Shang, C. Liu, X. Meng, X. Li and Q. Fan, 2018. China' energy–water nexus: Hydropower generation potential of joint operation of the Ththree Gorges and Qingjiang cascade reservoirs. *Energy* 142: 14–32. doi: 10.1016/j.energy.2017.09.131.

47. Shin, H. and S. Nam, 2016. Experimental study on the characteristics of ground heat exchange in heating greenhouse. *Protected Horticulture and Plant Factory* 25(3): 218–223. doi: 10.12791/KSBEC.2016.25.3.218 (in Korean).
48. Siddiqi, A and L. Anadon, 2011. The water–energy nexus in Middle East and North Africa. *Energy Policy* 39: 4529–4540. doi: 10.1016/j.enpol.2011.04.023.
49. Song, Y., C. Lim, W. Lee, K. Eom, S. Choi, E. Lee, and E. Kim, 2014. Applicability analysis of major crop models on Korea for the adaptation to climate change. *Journal of Climate Change Research* 5(2): 109–125 (in Korean).
50. Talozzi, S., Y. Sakaji and A. Altz–Stamm, 2015. Towards a water–energy–food nexus policy: realizing the blue and green virtual water of agriculture in Jordan. *International Journal of Water Resources Development* 31(3): 461–482. doi: 10.1080/07900627.2015.1040544.
51. Udink ten Cate, A. J., G. P. A. Bot and J. J. van Dixhoorn, 1978. Computer control of greenhouse climates. *Acta Horticulturae* 87: 265–272. doi: 10.17660/ActaHortic.1978.87.28.
52. Udink ten Cate, A. J., 1983. *Modelling and (adaptive) control of greenhouse climates. Ph.D. diss., Wageningen, the Netherlands: Wageningen Agricultural University.*
53. UNESCO, 2016. The United Nations world water development report 2016. UNESCO–IHE (United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization–International Institute for

Hydraulic and Environmental Engineering), Delft, the Netherlands.

54. Valek, A., J. Susnik and S. Grafakos, 2016. Quantification of the urban water-energy nexus in Mexico City, Mexico, with an assessment of water-system related carbon emissions. *Science of the Total Environment* 590-591: 258-268. doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.02.234.
55. van Beveren, P.J.M., J. Bontesma, G. van Straten and E.J. van Henten, 2015. Optimal control of greenhouse climate using minimal energy and grower defined bounds. *Applied Energy* 159: 509-519. doi: 10.1016/j.apenergy.2015.09.012.
56. van Henten, E.J., 1994. *Greenhouse climate management: an optimal control approach. Ph.D. diss., Wageningen, The Netherlands: Wageningen Agricultural University.*
57. van Henten, E.J. and J. Bontsema, 2009. Time-scale decomposition of an optimal control problem in greenhouse climate management. *Control Engineering Practice* 17: 88-96. doi: 10.1016/j.conengprac.2008.05.008.
58. Vilanova, M. and J. Balestieri, 2015. Exploring the water-energy nexus in Brazil: The electricity use for water supply. *Energy* 85: 415-432. doi: 10.1016/j.energy.2015.03.083.
59. White, D., K. Hubacek, K. Feng, L. Sun and B. Meng, 2018. The water-energy-food nexus in East Asia: A tele-connected value chain anaysis using inter-regional input-output analysis. *Applied Energy* 210: 550-567. doi:

10.1016/j.apenergy.2017.05.159.

60. Yoon, P. R. and J. Choi, 2018. Assessment of reference evapotranspiration equations for missing and estimated weather data. *Journal of Korean Society of Agricultural Engineers* 60(3): 15-25. doi: 10.5389/KSAE.2018.60.3.015 (in Korean).
61. Zhang, L. and R. Lemeur, 1992. Effect of aerodynamic resistance on energy balance and Penman-Monteith estimates of evapotranspiration in greenhouse conditions. *Agricultural and Forest Meteorology* 58: 209-228.
62. 국립농업과학원, 2015. 온실 환경설계기준(안), 71-80. 11-1390802-001029-01. 완주, 전라북도: 농촌진흥청 국립농업과학원.
63. 권진경, 2012. 농업시설의 에너지 진단 및 컨설팅 기술 개발, 85-93. PJ006607. 농촌진흥청 국립농업과학원, 수원, 경기도.
64. 김광수, 김수옥, 김준환, 문경환, 신재훈, 조재일, 2018. 국내 작물모형의 개발 및 활용. *한국농림기상학회지* 20(2): 145-148.
65. 김동현, 송영일, 류재나, 강해나, 박송미, 서일교, 2015. 넥서스 기반 통합적 기후환경 대응체계 구축 연구: 도시지역 기후적응정책 문제를 중심으로, 14-16. 세종시: 한국환경정책·평가연구원.
66. 김선주, 이주용, 김필식, 2003. 증발산량 산정기법에 따른 밭작물의 적정 관개량 모의. *한국농공학회지* 271-274.
67. 김성겸, 이상규, 이희주, 이준구, 2017. 스마트팜에 활용할 수

- 있는 원예 작물 생육 모델: 기술적, 설명적, 구조적 생육 모델의 활용. 전원과 자원 59(2): 28-37.
68. 박기중, 정상옥, 1999. 증발산량 추정식의 발달. 한국농공학회지 6(2): 195-205.
69. 성재훈, 조원주, 이현정, 2018, 농업자원 관리를 위한 물-에너지-식량 넥서스 구축방안, 농정포커스 제 167호, 한국농촌경제연구원.
70. 유승환, 2006. GIS를 이용한 논벼의 소비수량 산정, 서울대학교 석사학위논문.
71. 이승노, 박세준, 이인복, 하태환, 권경석, 김락우, 여옥현, 이상연, 2016. 건물에너지 시뮬레이션을 활용한 연동형 온실 및 작물에너지모델 설계 및 이의 냉·난방부하 산정. 시설원예·식물공장 25(2): 123-132.
72. 이승노, 2017. 작물 에너지교환을 고려한 온실 에너지모델 설계 및 에너지부하 산정, 서울대학교 석사학위논문.
73. 정강호, 오동식, 허승오, 2005. 시설 재배지의 점적관비에 따른 증발산량 추정연구. 농촌진흥청 국립농업과학연구원, 수원, 경기도.
74. 정상옥, 2010. FAO-AquaCrop을 이용한 기후변화가 벼 증발산량 및 수확량에 미치는 영향 모의. 한국농공학회 52(3): 57-64.
75. 홍은미, 2013. 시설재배지와 조림지 토양 및 천층지하수 영양물질 환경평가, 서울대학교 박사학위논문.

부 록

부록 A. 일별 토양물수지 분석 결과

Appendix A The results of daily soil water budget calculation (2012)

Date	10cm (%)	30cm (%)	60cm (%)	90cm (%)	Irrigation (ton)	Hargreaves (mm)	Water Budget (mm)
7/22	18.4	28.3	19.9	10.9	12	2.4	-6.15
7/23	18.3	28.3	19.9	11	0	4.8	-6.15
7/24	17.2	28.2	19.9	11	13	7.6	14.55
7/25	15.6	28	19.8	11	0	10.6	28.8
7/26	14.4	27.5	19.7	11	13	13.6	54
7/27	13	26.8	19.6	11	0	16.4	70.5
7/28	12.1	25.3	19.6	11.5	0	19.2	84.75
7/29	11.1	23.8	19.5	11.7	0	21.9	102.75
7/30	10.2	21.7	19.5	11.9	0	24.6	123.75
7/31	11.4	21.5	19.4	12	12	27.3	126.6
8/1	11.3	21.7	19.5	12.3	0	33.4	122.85
8/2	10.9	20.2	19.4	12.5	12	38.8	146.7
8/3	10.5	18.8	19.3	12.5	0	43.9	160.95
8/4	9.8	16.9	19.1	12.6	10	49.6	190.2
8/5	13	20	19.4	12.5	10	55.6	150.45
8/6	15.1	23.1	19.8	12.7	10	61.4	115.95
8/7	15.9	23.2	20	12.8	10	66.8	115.95
8/8	15.3	23	20	12.8	0	72.2	121.95
8/9	15.6	22	19.8	12.9	0	77.6	127.95
8/10	15.8	22.8	20	13.2	13	81.4	128.4
8/11	17.3	25.8	21.2	13.3	12	86.5	95.7
8/12	16.9	25.1	20.9	13.1	10	90.3	116.7
8/13	17.3	24.9	20.7	13.2	0	96.0	115.95
8/14	17.1	23.1	20.3	12.8	12	100.8	147.75
8/15	16.7	22.6	20.1	12.8	0	104.6	156
8/16	16.4	22.4	20.1	13	0	108.8	158.25
8/17	16.8	21.6	20	12.8	0	113.5	163.5
8/18	17.1	21.6	19.9	12.8	0	117.7	162
8/19	17.1	21	19.8	12.7	12	122.1	178.8
8/20	18.8	23	19.9	12.6	10	125.6	160.05
8/21	18.7	24	20.1	12.8	0	129.7	150.3
8/22	18.2	24.1	20.2	13	0	133.6	151.05

8/23	18	24.5	20.4	13	0	138.0	148.05
8/24	19.5	25.7	20.3	12.9	10	142.5	138.3
8/25	18.9	25.8	20.5	12.8	0	147.2	141.3
8/26	19.6	24.7	20.4	12.9	12	153.3	155.1
8/27	19.8	26.1	20.4	12.8	0	159.6	143.85
8/28	18.7	25.2	20.4	12.8	0	165.4	158.85
8/29	18.2	23.8	20.2	12.6	12	170.4	186.9
8/30	18.3	23.4	20.2	12.5	0	175.2	189.9
8/31	17.3	22.1	19.9	12.6	12	181.7	219.45
9/1	17.4	21.2	19.7	12.5	0	187.0	227.7
9/2	17.2	20.6	19.6	12.5	12	194.3	245.25
9/3	16.9	20.4	19.5	12.4	12	200.7	261.3
9/4	26.1	24.7	19.5	12.3	0	206.1	160.8
9/5	24.2	23.3	19.5	12.4	12	212.2	195.6
9/6	22.2	21.5	18.2	12.3	13	219.8	246.3
9/7	22.2	20.2	17.9	11.4	13	226.6	276.75
9/8	20.8	20.1	17.8	11.1	0	231.2	291
9/9	19.8	19.6	17.7	11.5	13	236.9	311.7
9/10	19.2	19.2	17	11.3	12	244.2	336.75
9/11	19.2	18.4	16.9	11.3	12	251.4	354.3
9/12	18.8	18.5	16.8	11.2	0	257.1	358.05
9/13	17.8	18.7	16.9	11.2	12	260.9	374.1
9/14	18	19.1	17	11.2	0	265.9	368.85
9/15	17.7	18.6	16.8	11.1	13	272.0	388.8
9/16	18.7	18.8	16.7	11.1	0	276.2	380.55
9/17	18.1	19.1	16.9	11	0	280.4	382.05
9/18	17.7	18.8	16.8	11	10	285.7	397.05
9/19	17.5	18.7	16.7	11	12	291.8	410.85
9/20	17.9	18.3	16.6	10.9	12	298.7	423.15
9/21	19.1	18.6	16.6	10.9	12	304.8	422.7
9/22	18.4	18.3	16.4	10.8	12	312.4	443.25
9/23	18	18.3	16.3	10.8	0	319.6	447
9/24	17.9	17.8	16.1	10.7	13	327.6	465.45
9/25	18	17.7	16	10.7	13	335.6	477.9
9/26	18.8	18.1	16	10.6	12	342.9	480.45
9/27	19.8	19.2	16.2	10.6	0	348.6	463.2
9/28	19.5	18.8	16.2	10.6	12	355.0	479.25
9/29	21.3	21.1	16.3	10.6	10	360.4	456.75

9/30	20.5	20.2	16.3	10.6	0	366.1	469.5
10/1	19.2	19.4	16.2	10.5	13	372.6	498.45
10/2	21	19.9	16.3	10.5	10	379.4	489.45
10/3	21	20.7	16.3	10.5	12	386.7	494.25
10/4	20.6	20.9	16.4	10.5	12	393.9	505.8
10/5	21	21	16.5	10.5	0	400.4	501.3
10/6	20.6	21	16.6	10.5	12	406.9	514.35
10/7	20.5	22.3	16.7	10.5	12	414.9	515.4
10/8	21.5	24.5	16.9	10.5	12	421.7	500.7
10/9	20.8	24.1	16.9	10.5	0	428.6	508.95
10/10	20.4	24	17	10.5	0	434.2	511.95
10/11	20	23.5	16.8	10.5	12	440.2	531
10/12	20.4	23.2	16.7	10.5	0	447.0	531
10/13	19.7	22.7	16.7	10.4	0	454.1	540.69
10/14	18.7	22	16.7	10.4	0	460.8	553.5
10/15	18.7	21.7	16.6	10.4	0	468.3	556.5
10/16	17.9	21.1	16.5	10.4	0	475.8	567.75
10/17	17	20.9	16.5	10.3	12	481.1	587.55
10/18	17.9	20.6	16.4	10.3	12	487.5	594.6
10/19	16.9	20.2	16.3	10.3	0	493.1	605.85
10/20	15.5	19.8	16.3	10.2	0	499.5	620.1
10/21	14.9	19.6	16.2	10.2	13	505.5	638.55
10/22	15.4	19.9	16.3	10.2	0	511.5	631.8
10/23	14.9	19.7	16.3	10.2	0	516.7	637.05
10/24	15.9	20.1	16.2	10.1	12	521.6	638.85
10/25	17	21.4	16.3	10.1	0	527.2	620.1
10/26	16.8	21.1	16.2	10.1	0	534.0	624.6
10/27	16.2	20.8	16.2	10.1	0	538.1	631.35
10/28	15.5	20.5	16.2	10	0	543.0	639.6

부록 B. Hargreaves ET_r 산정 결과

Appendix B Estimated value of Hargreaves ET_r (mm)

Region	Year	Min. Temperture Setting			
		12℃	14℃	16℃	18℃
Chuncheon	2013	621	632	643	653
	2014	598	606	615	624
	2015	612	621	627	637
	2016	604	613	621	629
	2017	629	638	648	657
	Average	612.8	622	630.8	640
Suwon	2013	612	623	633	643
	2014	562	570	579	588
	2015	551	557	563	571
	2016	547	553	560	568
	2017	565	573	582	590
	Average	567.4	575.2	583.4	592
Cheonju	2013	580	587	596	604
	2014	653	661	669	678
	2015	623	630	638	646
	2016	728	737	746	755
	2017	649	657	667	675
	Average	646.6	654.4	663.2	671.6
Daejeon	2013	706	716	726	737
	2014	706	716	725	734
	2015	725	733	743	751
	2016	728	737	746	755
	2017	755	764	776	785
	Average	724	733.2	743.2	752.4
Daegu	2013	742	751	761	772
	2014	694	702	711	719
	2015	678	686	695	702
	2016	643	651	658	666
	2017	704	714	723	733
	Average	692.2	700.8	709.6	718.4
Jinju	2013	700	711	721	734
	2014	646	656	666	676
	2015	648	658	667	677

	2016	447	452	459	465
	2017	531	539	546	553
	Average	594.4	603.2	611.8	621
Jeonju	2013	592	601	611	618
	2014	602	610	618	626
	2015	667	675	683	691
	2016	682	691	699	707
	2017	712	723	733	742
	Average	651	660	668.8	676.8
Gwangju	2013	650	659	668	677
	2014	620	628	636	644
	2015	653	661	668	675
	2016	679	687	695	703
	2017	723	731	742	750
	Average	665	673.2	681.8	689.8

부록 C. 난방에너지 부하 산정 결과

Appendix C Estimated value of heating energy load (GJ)

Region	Year	Min. Temperture Setting			
		12℃	14℃	16℃	18℃
Chuncheon	2013	3,757	4,440	5,348	7,031
	2014	3,115	3,866	4,989	6,632
	2015	2,791	3,558	4,572	5,946
	2016	2,974	3,680	4,844	6,644
	2017	2,742	3,378	4,387	6,002
	Average	3,076	3,784	4,828	6,451
Suwon	2013	2,897	3,505	4,439	5,782
	2014	2,051	2,712	3,745	5,119
	2015	2,226	3,304	4,915	7,015
	2016	2,478	3,241	4,479	6,160
	2017	2,188	2,739	3,589	4,955
	Average	2,368	3,100	4,233	5,806
Cheonju	2013	2,690	3,343	4,197	5,343
	2014	1,814	2,534	3,595	4,991
	2015	2,102	3,010	4,267	5,865
	2016	3,006	4,188	5,678	8,039
	2017	1,849	2,420	3,356	4,843
	Average	2,292	3,099	4,219	5,816
Daejeon	2013	2,615	3,178	3,908	4,989
	2014	1,939	2,618	3,699	5,273
	2015	2,239	3,166	4,729	6,623
	2016	3,006	4,188	5,678	8,037
	2017	1,933	2,530	3,480	4,942
	Average	2,346	3,136	4,299	5,973
Daegu	2013	1,894	2,448	3,214	4,166
	2014	1,520	2,193	3,448	5,209
	2015	1,763	2,635	4,070	6,352
	2016	2,437	3,258	4,558	6,474
	2017	1,708	2,232	3,297	5,020
	Average	1,864	2,553	3,717	5,444
Jinju	2013	2,061	2,559	3,181	4,021
	2014	1,841	2,536	3,600	5,204
	2015	2,132	2,849	4,059	5,734

	2016	1,980	2,799	4,160	5,984
	2017	1,848	2,448	3,444	4,952
	Average	1,972	2,638	3,689	5,179
Jeonju	2013	2,485	3,046	3,915	4,951
	2014	1,795	2,388	3,344	4,568
	2015	1,958	2,883	4,479	6,665
	2016	2,095	2,951	4,418	6,688
	2017	1,793	2,324	3,170	4,540
	Average	2,025	2,718	3,865	5,482
Gwangju	2013	1,882	2,427	3,191	4,227
	2014	1,514	2,170	3,232	4,669
	2015	1,729	2,631	4,135	6,548
	2016	1,801	2,585	4,060	6,353
	2017	1,541	2,052	3,048	4,615
	Average	1,693	2,373	3,533	5,282

Abstract

Relationship Analysis of Water–Energy Linkage in Greenhouse Cultivation for Water–Energy–Food Nexus Evaluation

Kim, Kwihoon

Major in Rural Systems Engineering

Department of Landscape Architecture and

Rural Systems Engineering

The Graduate School of Seoul National University

From the advance of Water–Energy–Food Nexus, many people hoped it to play a role in alleviating the worldwide pain arose from resource-overuse. For fully understand the WEF Nexus, analysing inter-linkages among three resources is very important. The concept of WEF nexus analysis was first introduced in 2011, which helps to interpret inter-linkages among the resources and stakeholders. The objective of this study was to analyze the relationship between water and energy in greenhouse cultivation. To analyse the water-energy linkage, this study estimated reference evapotranspiration and heating load. For the estimation, this study used the physical model to simulate the inside temperature of the agricultural plastic greenhouse using heating capacity, solar radiation, ventilated and transferred heat losses as

input variables. For estimating reference evapotranspiration and heating load, Hargreaves equation and seasonal heating load equation with HDH (Heating Degree-Hour) was applied. For calibration and validation of simulated inside temperature, used were hourly data observed from 2011 to 2012 in the multi-span greenhouse. Results of the simulation were evaluated using R^2 , MAE and RMSE, which showed 0.69, 2.77, 3.72 for calibration and 0.57, 2.67, 3.86 for validation, respectively. For validation of reference evapotranspiration estimated using Hargreaves equation, SMC (Soil Moisture Content) data measured 1m beneath the surface were applied to the soil water budget method. The results differed 97mm when crop evapotranspiration with soil water budget method was calculated as 640mm. After validating each model, this study was applied to the eight representative regions in Korea. When the minimum setting temperature was 12°C from 2013 to 2017, mean values of evapotranspiration and heating load were 687mm/year and 2,147GJ/year. For 18°C, Mean values of evapotranspiration and heating load were 707 mm/year and 5,616GJ/year. From the estimation, the relationship between water and heat energy was estimated as 1.0 ~ 2.6GJ/ton. Though additional calibrations with different types of greenhouses are necessary, the results of this study imply that they are applicable when evaluating resource relationship in the greenhouse cultivation complex.

Keywords: water-energy linkage; temperature simulation model;
evapotranspiration with Hargreaves equation; heating energy load

Student number : 2017-20147